

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
ESPECIALIDAD ELECTRÓNICA INDUSTRIAL



PROYECTO FINAL DE CARRERA

***ESTUDIO Y SIMULACIÓN EN RÉGIMEN ESTÁTICO DE UNA
MÁQUINA DE INDUCCIÓN ANTE HUECOS DE TENSION
MEDIANTE UNA APLICACION EN MATLAB.***

AUTOR: JORGE VÁZQUEZ GONZÁLEZ
TUTOR: DAVID SANTOS MARTÍN

FEBRERO DE 2012

AGRADECIMIENTOS

La realización de este proyecto no hubiera sido posible sin mi esfuerzo y dedicación, pero sobretodo, sin el apoyo y la ayuda prestada por todas las personas que me rodean, sin los cuales nada de esto hubiera sido posible.

En primer lugar, quería agradecer de todo corazón, el apoyo que me han proporcionado durante todos estos años mis padres y mi hermana, porque gracias a ellos no sólo he conseguido cumplir todos mis objetivos profesionales hasta el momento. Sino que a ellos debo agradecerles todo en esta vida, porque sin ellos no sería la persona que soy en este momento.

Por supuesto, merecen mención aparte, mis compañeros de viaje en estos años de universidad, cómo Jaime, Alberto, Héctor, Santi, Gonzalo, Razvan, Carlos, Rafa y tantos otros. Gracias a todos y cada uno de vosotros, por haberme proporcionado vuestra amistad, y mi único deseo a partir de ahora es conservarla.

Por supuesto, agradecerle la ayuda prestada a mi tutor de este proyecto, David Santos, ya que sin su paciencia y ayuda, la realización de este trabajo hubiese resultado imposible.

Y a mis niñas, Miriam y Adriana, les dedico muchísimo más que este trabajo. A ellas les dedico mi vida.

*“Tener un objetivo en la vida y cumplirlo, es maravilloso,
pero conseguirlo rodeado de la gente que quieres
lo hace más especial si cabe”*

INDICE GENERAL

- I. Agradecimientos
- II. Índice general
- III. Índice de figuras
- IV. Índice de tablas

Capítulo 1: Introducción

1.1 Objetivo y alcance.....	PAG.10
1.2 Estructura del trabajo.....	11
1.3 Historia de la máquina de inducción y su aplicación en eólica.....	12
1.4 Integración de la energía eólica en la red.....	17

Capítulo 2: Principio de funcionamiento de la maquina asíncrona

2.1 Descripción del motor eléctrico asíncrono trifásico.....	20
2.2 Circuito eléctrico.....	25
2.2.1 Producción de la F.E.M.....	25
2.2.2 Relación de transformación.....	27
2.3 Circuito magnético.....	29
2.3.1 El campo giratorio.....	29
2.3.2 Flujo principal y flujos de dispersión.....	30
2.3.3 Factores de Cáster.....	31
2.4 Circuito equivalente.....	32
2.4.1 Jaula simple.....	32
2.5 Balance de potencias y rendimiento.....	33
2.6 Par motor y par resistente.....	37
2.7 Arranque y aceleración.....	39
2.8 Tiempo de arranque.....	39
2.9 Corriente y par de arranque.....	41
2.10 Tipos de arranque en motores de inducción.....	41

Capítulo 3. Descripción del procedimiento para la obtención del circuito equivalente según norma

3.1 Norma IEC 60034-2-1.....	44
3.1.1 Generalidades.....	45
3.1.2 Consideraciones respecto a las medidas a efectuar.....	45
3.1.3 Ensayos para la medida de la resistencia.....	45
3.1.4 Ensayo de vacío.....	46
3.1.5 Ensayo con el rotor bloqueado.....	48
3.1.6 Determinación del circuito equivalente.....	48
3.1.7 Asignación de pérdidas adicionales.....	51

Capítulo 4: Huecos de tensión

4.1 Introducción a los huecos de tensión.....	55
4.2 Caracterización de los huecos de tensión.....	57
4.3 Origen de los huecos.....	58
4.3.1 Análisis de la red eléctrica ante huecos trifásicos.....	59
4.3.2 Huecos desequilibrados.....	61
4.4 Sistemas de corrección para huecos de tensión.....	63

Capítulo 5: Creación de la interface en Matlab

5.1 Comparativa de software.....	67
5.2 Creación de una GUI en <i>Matlab</i>	68
5.3 Partes de una GUI.....	71
5.4 Tipo de <i>uicontrols</i>	72
5.5 Estructura de la interface.....	75
5.6 Implementación del cálculo numérico sobre <i>Matlab</i>	80
5.7 Generación de ejecutables.....	84

Capítulo 6: Simulación de la máquina de inducción

6.1 Regímenes posibles según el deslizamiento.....	88
6.2 Curva par-velocidad con variación de tensión.....	89
6.3 Curva potencia y rendimiento frente a la velocidad.....	92
6.4 Curva de la corriente y factor de potencia/ velocidad.....	93
6.5 Estudio de la curva par-velocidad variando nº polos y f.....	94
6.6 Resultados de los ensayos.....	96

Capítulo 7: Conclusiones

7.1 Síntesis.....	100
7.2 Conclusiones.....	101
7.3 Líneas futuras.....	102

Capítulo 8: Estudio Económico y repercusiones sobre el medio ambiente

8.1 Introducción.....	104
8.2 Viabilidad.....	104
8.3 Presupuesto.....	106
8.4 Implicaciones Ambientales.....	107

Bibliografía

Anexo

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Evolución de la potencia eólica instalada en España.....	PAG. 17
Fig. 2.1 Motor eléctrico trifásico con carcasa de aluminio.....	20
Fig. 2.2 Despiece de una maquina de inducción.....	21
Fig. 2.3. Pares de polos.....	22
Fig. 2.4 Esquemas de conexión para las máquinas trifásicas con rotor de jaula de ardilla.....	24
Fig. 2.5 F.e.m de los devanados concéntricos y distribuidos.....	25
Fig. 2.6 Devanado de bobinas iguales a) y desiguales b).....	27
Fig. 2.7 Circuito equivalente para motor de jaula simple.....	32
Fig. 2.8 Distribución de pérdidas.....	36
Fig. 2.9 Símil hidráulico del balance de potencias.....	39
Fig. 2.10 Par motor.....	38
Fig. 2.11 Par de aceleración.....	38
Fig. 2.12 Tiempo de arranque.....	40
Fig. 2.13 Conexión estrella-triángulo.....	42
Fig. 2.14 Arranque estrella-triángulo.....	42
Fig. 3.1 Comparación de consumo de energía eléctrica en el mundo a finales de 2005.....	44
Fig. 3.2 Pérdidas constantes a partir del ensayo e vacío.....	47
Fig. 3.3 Pérdidas en el hierro a partir del ensayo de vacío.....	47
Fig. 3.4 Circuito equivalente de jaula simple.....	48
Fig. 3.5 Pérdidas adicionales según la potencia útil.....	52
Fig. 3.6 Tramos de la curva de las pérdidas adicionales.....	52
Fig. 4.1. Clasificación de los huecos de tensión en forma fasorial.....	56
Fig. 4.2 Caracterización de hueco de tensión. V (0.33, 210).....	57
Fig. 4.3 Esquema monofásico del sistema bajo una falta trifásica.....	59
Fig. 4.4 Esquema simplificado del sistema bajo una falta trifásica.....	59
Fig. 4.5 Dependencia de la profundidad de un hueco de tensión. Fuente Red Eléctrica de España.....	60
Fig. 4.6 Esquema de un generador de huecos de tensión.....	61
Fig. 4.7 Componente directa.....	61
Fig. 4.8 Componente inversa.....	62
Fig. 4.9 Componente homopolar.....	62
Fig. 4.10 Circuito de un inyector en serie.....	63
Fig. 4.11 Diagrama de bloques de un DVR.....	64
Fig. 4.12 Diagrama de bloques de maquina síncrona con volante de inercia.....	64
Fig. 4.13 Diagrama de bloques de un STATCOM.....	65
Fig. 4.14 Diagrama de bloques de un crowbar activo.....	65
Fig. 5.1 Ventana principal de Matlab.....	68
Fig. 5.2 Creación de una GUI en Matlab.....	69
Fig. 5.3 Selección del tipo de GUI.....	70
Fig. 5.4 Código inicial de la interface.....	70
Fig. 5.5 Interface en blanco.....	71
Fig. 5.6 Componentes de la GUIDE.....	71
Fig. 5.7 Ciclo de operación de la interface gráfica.....	73
Fig. 5.8 Jerarquía de objetos gráficos de Matlab.....	74

Fig. 5.9 <i>Property inspector</i> del texto estático de la R fe.....	75
Fig. 5.10 <i>Property inspector</i> del texto editable de R fe.....	76
Fig. 5.11 Parámetros del <i>push botton</i> del deslizamiento.....	77
Fig. 5.12 Propiedades del panel.....	77
Fig. 5.13 Programación del <i>slider</i> de tensión.....	78
Fig. 5.14 Código para grafica par/rendimiento frente a velocidad.....	78
Fig. 5.15 Programación logo universidad.....	79
Fig. 5.16 Alineación de objetos dentro de la interface.....	79
Fig. 5.17 Parámetros de la máquina asíncrona.....	81
Fig. 5.18 Circuito con impedancias equivalentes.....	81
Fig. 5.19 Equivalente Thevenin.....	83
Fig. 5.20 Tipos de archivos ejecutables desde Matlab.....	84
Fig. 5.21 Instrucción para la creación de nuevos ejecutables.....	85
Fig. 5.22 Adición de archivos .m.....	86
Fig. 6.1 Tipos de comportamiento de máquina asíncrona.....	88
Fig. 6.2 Puntos notables de la curva par- velocidad.....	89
Fig. 6.3 Comportamiento del par según el tipo de arranque.....	90
Fig. 6.4 Curva par-velocidad a 690V y 380V de línea.....	91
Fig. 6.5 Curva potencia-velocidad a 690 V y 380V.....	92
Fig. 6.6 Recta rendimiento-velocidad a 690 V y 380V.....	93
Fig. 6.7 Curva de la corriente y fdp en la máquina de inducción con 690 V y 380V.....	94
Fig. 6.8 Variación de la velocidad modificando los polos de 4 a 8.....	95
Fig. 6.9 Rango de frecuencias para variar la velocidad.....	95
Fig. 6.10 Variación de la frecuencia (50 a 60 Hz) para regular la velocidad.....	96
Fig. 6.11 Resultados obtenidos.....	96
Fig. 6.12 Interface en funcionamiento.....	97
Fig. 6.13 Curvas obtenidas.....	97
Fig. 8.1 Distribución de la capacidad instalada por fabricante en España a finales de 2004....	104
Fig. 8.2 Evolución de la potencia eólica instalada en España.....	105
Fig. 8.3 Potencia eólica instalada en España por comunidades Autónomas,a finales de 2004.	106

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.I Perturbaciones que pueden afectar a la red en un parque eólico.....	PAG. 18
Tabla 3.I Comparación entre la norma IEC 60034-2-1 y la usada anteriormente.....	44
Tabla 3.II Tabla de pérdidas adicionales.....	53

CAPITULO 1:
INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo y alcance

El objetivo de este trabajo es el de, principalmente, modelar una máquina asíncrona mediante la creación de una interface en Matlab (GUI). Con la cual podemos definir la actuación de un motor de inducción de manera estática. Y de la misma forma, servirá para estudiar su comportamiento ante huecos de tensión.

Según la norma IEC 60034.2.1, se ha sido descrito el procedimiento para la obtención del circuito equivalente de una máquina de inducción de una manera práctica.

Debido a los huecos de tensión, se producen muchos comportamientos inesperados en los motores. Por lo tanto, en este proyecto se procederá al análisis de los métodos de corrección de éstos, así como el análisis de la repercusión que pueden llegar a tener sobre la red eléctrica.

A su vez, se estudia tanto la curva par-velocidad así como las curvas definidas por la corriente, $\cos \phi$, potencia y rendimiento respecto a la velocidad mediante diferentes simulaciones. En estas simulaciones, también se podrá variar tanto la tensión como los diferentes parámetros de la máquina para poder estudiar mejor el comportamiento del motor asíncrono.

Por último, se procederá al estudio y valoración de los resultados obtenidos tanto del par como de las diferentes gráficas.

1.2 Estructura del trabajo

Este trabajo consta de 8 capítulos y un anexo con el código empleado.

Capítulo 1: Introducción.

Capítulo 2: Resumen de la máquina de inducción. Circuito eléctrico, magnético y circuito equivalente. Balance de potencias y pérdidas en el motor. Así como el par motor el par resistente y los tipos y el tiempo de arranque.

Capítulo 3: Obtención del circuito equivalente así como de las pérdidas adicionales que nos podemos encontrar. Todo basado en la norma reguladora IEC 60034-2-1.

Capítulo 4: Caracterización, origen y análisis de los huecos de tensión.

Capítulo 5: Creación de una interface (GUI) en Matlab. Cálculo numérico sobre Matlab de los parámetros usados.

Capítulo 6: Simulaciones de las correspondientes curvas y representación de ellas. Valoración de resultados.

Capítulo 7: Síntesis y conclusiones de los resultados. Líneas futuras.

Capítulo 8: Viabilidad económica y repercusión sobre el medio ambiente.

Bibliografía.

Anexo.

1.3 Historia de la máquina de inducción y su aplicación en eólica

Los principios básicos del electromagnetismo se empiezan a desarrollar a finales del siglo XIX, con los experimentos de *Oersted*, *Faraday*, *Henry*, *Lenz*, *Barlow* y la sintetización que hizo Maxwell (1879). Dentro de todos estos trabajos que realizaron los científicos anteriores, se puede considerar como punto de partida para el estudio de las máquinas eléctricas, el principio de inducción electromagnética descubierto por Michael Faraday (1831). Los posteriores experimentos demuestran de una manera evidente el principio de conversión de la energía mecánica en eléctrica y viceversa (principio dinamo-eléctrico).

La ley de inducción de Faraday fue el detonante para que muchos científicos e ingenieros buscaran una máquina eléctrica que generase electricidad de un modo diferente al que se conocía en aquellos tiempos, como podía ser la pila de Volta. Podríamos calificar este hecho como el nacimiento de la ingeniería eléctrica. En estos casi ciento setenta años de historia, se han producido grandes transformaciones y la ingeniería eléctrica que originalmente comprendía la conversión de energía: máquinas eléctricas, la telegrafía, el alumbrado y la telefonía, se ha desarrollado de una manera tan espectacular, que hoy día ha dado lugar a nuevas áreas, en los cuales se incluyen aspectos tan diversos como la electrónica, telecomunicaciones, los ordenadores, el control automático de máquinas y procesos.

Durante la primera época de desarrollo de esta rama de la técnica, las máquinas eléctricas desempeñaron un papel muy importante, ya que determinaba el movimiento de toda la Ingeniería Eléctrica, gracias a su aplicación en los campos de la generación, transformación y utilización de la energía eléctrica.

El constante perfeccionamiento en el diseño de máquinas eléctricas contribuían a nuevas posibilidades de su empleo práctico y a su vez estimulaban un progreso cada vez mayor de éstas y las más diversas aplicaciones de la energía eléctrica, lo que explica el hecho de que especialmente los científicos e ingenieros le prestasen una gran atención, y de que ésta adquiriese rápidamente la perfección técnica de sus formas constructivas que poseen en la actualidad.

Las máquinas eléctricas se plantean como convertidores de energía mecánica a energía eléctrica: en este caso llamados generadores; o a la inversa, como convertidores de energía eléctrica a mecánica: en este otros casos los llamaremos motores. Una máquina eléctrica es un convertidor de energía de una forma a otra, una de las cuales al menos es eléctrica, y de acuerdo con ello se clasifican en:

- a- Generadores: Que transforman la energía mecánica en eléctrica.
- b- Motores: Que transforman la energía eléctrica en mecánica.
- c- Transformadores: Que transforman una energía eléctrica.

En el campo de los motores de c.a. de tipo asíncrono o de inducción, en 1879 W alter Baily demostró ante la *Physical Society* de Londres, la posibilidad de producir una rotación mediante las corrientes inducidas sobre un disco de cobre. *Ferraris*, en 1885, descubrió el campo magnético giratorio, utilizando dos corrientes alternas independientes de igual frecuencia pero con una fase diferente. Prácticamente, este mismo descubrimiento, fue hecho casi a la vez por *Nikola Tesla*, que fue el primero que construyó y patentó este tipo de motores en Octubre de 1887 y por esto, se le considera el inventor de los mismos.

Todos ellos disponían de un estator en forma de anillo. El primer tipo tenía un rotor con cuatro polos salientes, dando lugar a un motor de reluctancia que no poseía cualidades de auto arranque, sin embargo, este motor giraba a la velocidad de sincronismo, el segundo motor era un verdadero motor asíncrono, tenía el rotor devanado que podía arrancar pero que giraba a una velocidad por debajo de la correspondiente al sincronismo y el tercero era motor síncrono, el cual funcionaba suministrando corriente continua al devanado del rotor.

Cabe destacar que los primeros motores asíncronos eran bifásicos y con polos salientes en el estator, solían estar alimentados con dos corrientes desfasadas 90° en el tiempo y utilizando dos devanados desfasados 90° en el espacio.

George Westinghouse compró las patentes de *Tesla* y utilizó a este ingeniero como consultor de su empresa; con la ayuda de C.F. Scott y B.G. *Lamme*, la Empresa Westinghouse fue capaz de desarrollar un motor bifásico con devanados distribuidos tanto en el estator como en el rotor, lográndose un motor práctico alrededor de 1892. En la Feria Mundial de Chicago de 1893, la fábrica de Westinghouse presentó un motor bifásico de 300 CV, 12 polos a 220V, que era un gran logro para esa época; la alimentación de este motor se lograba mediante dos alternadores monofásicos de 500 CV, 60 Hz, acoplados mecánicamente en un mismo eje, pero que estaban desplazados 90° eléctricos en el espacio para poder generar una tensión bifásica.

En 1891, una Compañía americana llamada *Thomson-Houston* comienza la construcción de motores de inducción trifásicos bajo la dirección de *H.G. Reist* y *W.J. Foster*. Por otro lado en Europa, *Dolivo-Dobrowolsky*, ingeniero de la Empresa alemana AEG, sugirió la utilización de circuitos trifásicos pero no independientes entre sí, sino que éstos estuvieran mutuamente conectados; de este hecho, sobrevino la expresión alemana *Verkettung der Phasen* (encadenamiento de fases), traduce esta dependencia mutua de las tres corrientes que constituyen un sistema trifásico. Este sistema lo bautizó con el nombre *Drehstrom* (corriente giratoria) alrededor de 1890.

Para el año 1893 *Dolivo- Dobrowolsky* había sido capaz de construir motores asíncronos de doble jaula de ardilla que mejoraban las cualidades de arranque de estos motores, también sugirió la construcción del motor de inducción con rotor devanado o con anillos deslizantes, para regular la velocidad del mismo, para conseguirlo es preciso conectar a los anillos un reóstato de arranque y la

regulación de un modo equivalente al de los motores de c.c.

En EEUU, surgió una fusión entre las Compañías *Westinghouse* y la *Thomson-Houston* para fabricar motores asíncronos trifásicos, para ello resultó de gran utilidad en aquel momento el invento del ingeniero C.F. Scott de la Empresa *Westinghouse* para transformar un sistema bifásico en trifásico y poder alimentar estas máquinas. El rotor de jaula de ardilla construido mediante barras de aluminio, fue patentado en 1916 por *H.G. Reist* y *H. Maxwell* de la Compañía *General Electric*.

El motor asíncrono o de inducción es el motor que se utiliza de manera más frecuente en el accionamiento industrial. Para comprender la evolución tecnológica de estas máquinas, sirva el dato comparativo de que un motor de 100 CV diseñado en la actualidad (1992), ocupa el mismo espacio que otro de 7.5 CV que había sido construido en 1897.

Los desarrollos de las máquinas eléctricas en el siglo XX están referidos a la mejora, sobretodo, en los materiales constructivos, fundamentalmente las chapas magnéticas y los aislamientos. Las primeras máquinas eléctricas se construían con hierro macizo, más tarde se emplearon chapas de hierro sueco de alta calidad.

En 1900, *Hadfield* y el equipo que trabajaba con él, de la Universidad de Dublín, publican un trabajo sobre la tecnología de las chapas magnéticas laminadas en caliente. En este trabajo se demuestra, que al añadir una pequeña cantidad de silicio al hierro se consiguen reducir las pérdidas hasta en un 75%. Este tipo de chapa representó un enorme avance en la construcción de las máquinas durante un largo periodo de tiempo, aproximadamente unos 30 años, lográndose aumentar ostensiblemente el rendimiento de las mismas.

El hecho del desarrollo de la teoría de los dominios magnéticos, en la que se explicaba el fenómeno del ferromagnetismo, N.P. Goss en 1934 descubre la técnica del laminado en frío, que es esencialmente la base del proceso de fabricación de las chapas de grano orientado que se emplean en la actualidad. Las investigaciones modernas más avanzadas intentan sustituir las chapas magnéticas por aleaciones amorfas (78% de hierro, 13% de boro y 9% de silicio) que tienen una resistividad muy elevada y una excelente resistencia mecánica.

Acerca de los aislamientos, también han sufrido grandes cambios; desde el hilo de cobre recubierto de algodón, pasando por los barnices, hasta las modernas resinas sintéticas, que son mucho más utilizadas en la actualidad al soportan mayores tensiones dieléctricas.

Otros avances más recientes, se refieren a la refrigeración que inicialmente era por aire y que aún se usan en máquinas de potencia media y pequeña, pasando por la refrigeración con hidrógeno utilizada en los grandes turboalternadores.

Como se ha señalado, el motor de c.a. de inducción o asíncrono es más barato en su construcción que el motor de c.c. y además apenas requiere un mantenimiento. Es por ello que los ingenieros han intentado, a lo largo de la historia, buscar procedimientos de regulación de velocidad fiables y seguros para este tipo de motores. Los convertidores más empleados son los siguientes:

- a- Los grupos rectificador-inversor que transforman primeramente la c.a. de la red en c.c., llamado módulo rectificador, y que luego cambian la c.c. en una c.a. de amplitud y frecuencia variables, denominado como módulo inversor.
- b- Los grupos ciclo convertidores, que son cambiadores directos de frecuencia y que transforman una potencia de c.a. en otra que posee una frecuencia diferente, sin el paso intermedio por c.c.

El motor de inducción al funcionar con c.a. presenta unas fmm de estator y rotor muy acoplados, lo que ha hecho muy difícil la regulación de su velocidad hasta hace relativamente poco tiempo. La forma de regular la velocidad consistió inicialmente (en los motores en jaula de ardilla), en variar la tensión de alimentación al estator mediante *triacs*; este método estaba caracterizado por una pobre respuesta tanto estática como dinámica, se solía emplear en el accionamiento de ventiladores y bombas centrífugas que ofrecen un pequeño par resistente en el arranque. Un método mejor era regular la frecuencia de alimentación, ya que la velocidad de giro es cercana a la de sincronismo. Sin embargo tampoco se lograba una respuesta satisfactoria y la instalación de estos equipos suponía un gasto demasiado grande.

El mejor método, sin duda, constaba en regular el flujo de la máquina, lo que se conseguía con un control simultáneo de la tensión y la frecuencia de alimentación, era la regulación del cociente tensión/frecuencia, que requería el uso de sistemas de encendido de los tiristores demasiado complicado.

La técnica más avanzada en la aplicación de la electrónica de potencia a los motores de inducción, la constituye el control vectorial. Este sistema introducido a comienzos de la década de los '70 por *F. Blaschke*, ingeniero de la Casa Siemens, fue desarrollado teóricamente, por el profesor alemán Leonard e implementado con posterioridad, con microprocesadores.

La idea está basada en el funcionamiento de una máquina de c.c.; en el motor de inducción de jaula de ardilla, a diferencia con el motor de c.c. solamente existe un devanado accesible, que es el del estator, y tanto el campo magnético como la fmm del entrehierro son móviles y no permanecen fijas en el espacio sino que giran a la velocidad de sincronismo, para complicar más este tema, el ángulo espacial entre el campo y la fmm no es necesariamente 90° eléctricos como en los motores de c.c.; por analogía con estas máquinas, se puede descomponer la

corriente del estator I_s en dos componentes: una de ellas, paralela al eje del campo I_d (eje d) y la otra, perpendicular al mismo I_q (eje q). La componente en el eje d es responsable de la generación de flujo, mientras que la componente en el eje q es la que produce la fmm y por lo tanto el par.

La componente I_d es equivalente a la corriente de excitación de los polos en los motores de c.c., mientras que la componente I_q es equivalente a la corriente del inducido. Por desgracia las componentes anteriores no se encuentran en los terminales del motor de inducción; sin embargo, la corriente del estator I_s se puede descomponer en dos componentes I_a e I_b respecto a las coordenadas móviles del flujo giratorio del estator (que forma un ángulo ϕ con el del campo resultante en el entrehierro). En definitiva, existe la posibilidad de calcular I_d e I_q si se conocen I_a e I_b y el ángulo ϕ y este cálculo debe hacerse constantemente en tiempo real, por lo que es necesario el uso de un microprocesador, debido a este hecho, el retraso en ser implementado este sistema de control en la ingeniería..

Se requiere por tanto, un bloque funcional que al tomar como parámetros de entrada las corrientes I_a e I_b nos dé lugar a las salidas I_d e I_q (campo magnético y par). Este bloque funcional es capaz de representar la transformación de las coordenadas del estator a las coordenadas del campo orientado que tiene lugar en el interior de la máquina. Cualquier cambio sufrido en I_a e I_b dará lugar a un cambio en las salidas I_d e I_q , determinadas por la realimentación del ángulo incluyen en el lazo de control mediante otro bloque funcional, que se obtiene mediante un codificador o detector de posición situado en el eje de la máquina.

A la hora de conseguir el control vectorial, se necesita también compensar la transformación anterior en el interior de la máquina. Esta descripción simplificada del control vectorial, darán una idea al lector de la complejidad cada vez mayor que toman los accionamientos de las máquinas eléctricas, haciendo bien patente la tecnologías interdisciplinares que se incluyen en ella.

Actualmente se graban programas en memorias tipo PROM (*Programmable read only memory* o memorias programables de sólo lectura) o EPROM (*Erasable programmable read only memory*, es decir memorias de sólo lectura grabadas por el usuario y que pueden borrarse), que incluyen no solamente la definición de las ecuaciones de los bloques funcionales, sino que también nos permiten realizar los arranques de un motor asíncrono controlando tanto la rampa de aceleración, cómo la corriente de arranque.

A raíz de la necesidad de buscar métodos alternativos para la producción de energía, se empezó a introducir a la máquina de inducción en aerogeneradores. Este hecho surgió por la necesidad de un cambio tanto en aspectos técnicos y administrativos de la estructura en los sistemas eléctricos. Con el crecimiento de la implantación en el territorio español de los aerogeneradores surgió la necesidad de implantar modelos de máquina cada vez más grandes ya que la cantidad de potencia que se debía generar

era cada vez mayor y el aire es un fluido muy pequeño. Ahora mismo en España se ha llegado, aproximadamente, a cubrir un 30% de la energía demandada en nuestro territorio. Aunque muchos días la producción de la energía eólica es prácticamente inexistente, la colocación de los aerogeneradores en puntos estratégicos de la península (En primer lugar Galicia, seguido por Castilla y León, Castilla La Mancha y Aragón) hace que se puedan alcanzar los límites anteriormente descritos de potencia suministrada por esta red eólica. Alemania, España, Estados Unidos, India y Dinamarca son las regiones que han apostado más fuerte por la energía eólica.

En la siguiente figura se puede ver el crecimiento histórico de la potencia eólica instalada en España.

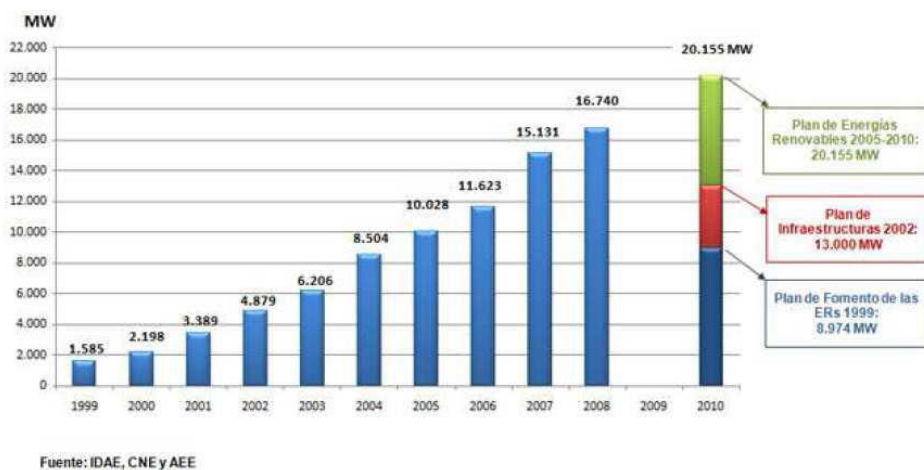


Fig. 1.1 Evolución de la potencia eólica instalada en España.

Si bien, en los primeros parque eólicos la tendencia fue la de instalar turbinas de velocidad fija con rotores asíncronas de rotor cortocircuitado, las últimas tendencias indican el uso de turbinas de velocidad variable generalmente con generadores asíncronos doblemente alimentados.

1.4 Integración de la energía eólica en la red

Cuando hablamos de la integración de la energía eólica debemos diferenciar dos campos de aplicación de aerogeneradores, uno que abarca una potencia generada entre aproximadamente 100 kW y 5 MW. En este rango se forman normalmente parques eólicos para la generación de energía eléctrica. Y otro rango que oscila por debajo de los 100 kW, que funcionan normalmente aislados de la red, en conjunto con sistemas de almacenamiento de energía, normalmente baterías o formando parte de otros sistemas híbridos para la alimentación de sistemas remotos.

Con la proliferación de las instalaciones de energías renovables en la red, los sistemas eléctricos que eran conocidos hasta el momento, han experimentado cambios debido a que anteriormente se usaban mayoritariamente generadores síncronos, mientras que ahora ha habido que realizar una reestructuración de estos sistemas. El

acoplamiento de estos dispositivos sin que esto influya a la calidad y fiabilidad de la red supone un gran esfuerzo para todas las partes.

Según la norma EN 50160, se pueden observar las principales perturbaciones que afectan a la red en un parque eólico. Se muestran en la siguiente tabla.

Frecuencia		Variaciones de frecuencia	Alteración de la frecuencia de red, generalmente medida en promedios de 10 segundos. Habitual en generadores aislados.
Amplitud	Duración: > 1 ciclo	Transitorios	Variaciones lentas de tensión: Aumento o disminución del valor eficaz debido, generalmente a las variaciones de la carga. Sobretensiones: Aumento en la tensión, generalmente pasan desapercibidas y duran unos 8,3 ms. Huecos: Disminuciones del valor eficaz, comprendidos entre el 90 % y el 1 % de la tensión nominal y duración entre medio ciclo y un minuto.
		Periódicas	Fluctuaciones: Cambios del valor eficaz que se repiten de forma periódica. Flicker: Sensación de parpadeo en el alumbrado, debido a fluctuaciones de la tensión entre 0,5 Hz y 25 Hz.
	Duración: < 1 ciclo	Transitorios	Variaciones rápidas de tensión: Cambio del valor eficaz mantenido durante un tiempo indefinido y sin ninguna cadencia conocida de repetición. Transitorios (Picos y Huecos): Perturbaciones, generalmente picos con oscilación, causadas por conexión - desconexión de cargas inductivas o capacitivas o por descargas atmosféricas
		Periódicas	Armónicos: Variaciones periódicas de amplitud cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental.
Simetría		Desequilibrios	Condición en la que los valores eficaces de la tensión en las tres fases no son iguales, o los ángulos entre fases consecutivas no son iguales.

Tabla 1.I Perturbaciones que pueden afectar a la red en un parque eólico.

No obstante, también se debe distinguir en este proceso de conexión a la red, entre máquinas de paso fijo y velocidad fija y máquinas que disponen de cambio de paso. O bien, máquinas con cambio de paso y velocidad variable.

Si, por ejemplo, se está ante un aerogenerador de paso y velocidad variable, el sistema debe medir la velocidad del viento en todo momento. Si en un tiempo no hay suficiente viento para el correcto funcionamiento del aerogenerador, se inicia el proceso de arranque automático.

Por último, cabe recordar que en el conexión de generadores eólicos a la red tiene influencia tanto el punto de operación del sistema como el flujo de cargas. Así, se puede observar como una parte muy importante en la generación de la energía eólica de perturbaciones que se puedan producir en la red son los huecos de tensión que producen nuestras máquinas de inducción.

CAPITULO 2:
PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO
DE LA MÁQUINA ASÍNCRONA

2.1 Descripción del motor eléctrico asíncrono trifásico

Un motor de inducción no es más que un transformador eléctrico cuyo circuito magnético está separado, por medio de un entrehierro, en dos partes:

- Estator: La parte fija.
- Rotor: Que es la parte móvil de la máquina.

El estator está formado por un devanado (denominado primario) situado en un núcleo de chapas magnéticas de hacer, estas chapas se encuentran ranuradas. El rotor al igual que el estator, posee también un núcleo de chapas magnéticas ranuradas en el cual se sitúa un devanado (denominado secundario), pero éste, puede no ser bobinado, sino que puede llegar a contener unas barras de cobre, bronce, o aluminio unidas en los extremos a unos anillos (rotor de jaula de ardilla) que las cortocircuiten.

Entre el estator y el rotor existe una separación de aire. Ésta debe ser lo más reducida posible y no puede existir roce alguno. A esta separación se la denomina entrehierro. Cuando se suministra una corriente alterna, procedente de una red, al devanado primario, se induce una corriente de sentido opuesto en el devanado secundario, produciéndose flujo magnético en el entrehierro, siempre que éste último esté cerrado en cortocircuito o a través de una impedancia exterior. Dicho flujo magnético determina un par de giro sobre el rotor transformando la energía eléctrica de la cual se dispone en energía mecánica. En los motores asíncronos trifásicos, se hacen circular corrientes alternas que generan un campo magnético sinusoidal que gira de manera síncrona (velocidad de sincronismo) con la frecuencia de la fuente de alimentación del motor.

El motor de inducción en vacío puede llegar a alcanzar velocidades casi iguales a la de sincronismo, pero en el momento en que se aplique carga, la velocidad se reduce a un valor inferior al de sincronismo, de este hecho el nombre de motores asíncronos.

La característica primordial que distingue a la máquina de inducción de los otros tipos de motores eléctricos, es que las corrientes secundarias tan sólo son generadas por inducción, como en un transformador, en vez de ser suministradas por una excitatriz de corriente continua u otra fuente exterior de energía, como ocurre en las máquinas síncronas y en las de corriente continua.



Fig. 2.1 Motor eléctrico trifásico con carcasa de aluminio

Aquí, en la figura 2.1 se aprecia un motor eléctrico trifásico clásico, utilizado tanto en aerogeneradores como en muchas otras industrias. Mientras que en la figura 2.2 se observa el despiece de ésta.

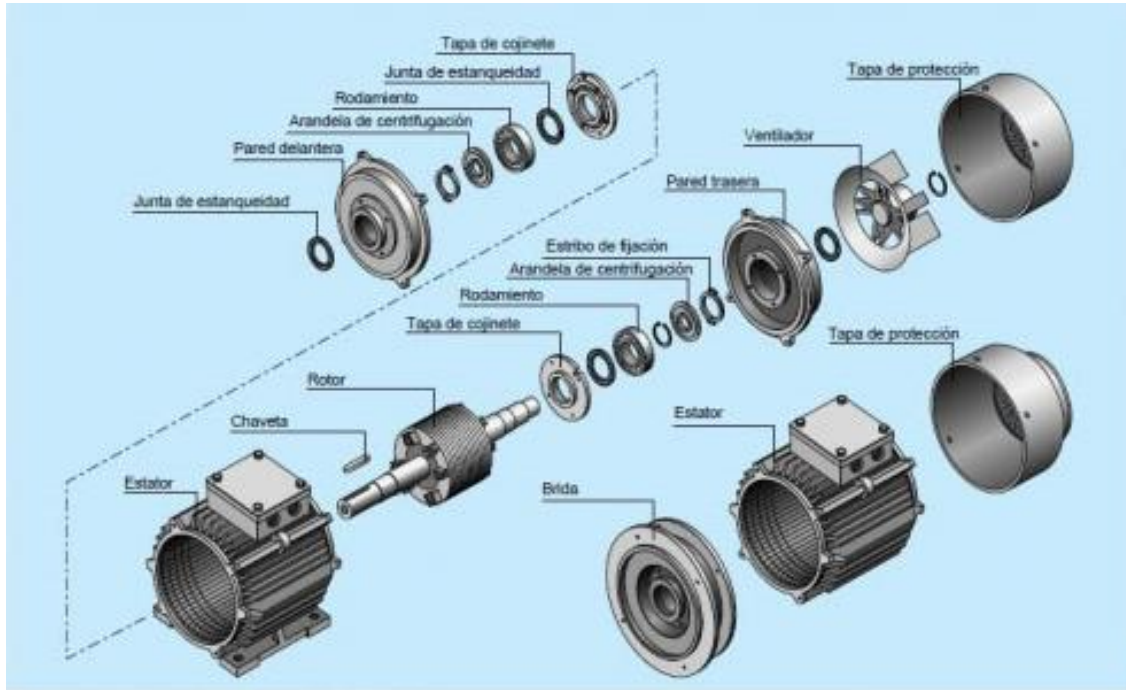


Fig. 2.2 Despiece de una maquina de inducción

El devanado estatórico de p , pares de polos, es alimentado por el sistema de corrientes trifásicas de la red, de pulsación ω [rad/s], creando un campo giratorio de velocidad angular $\Omega = \omega/p$ [rad/s], que expresada en vueltas por minuto, viene dada por:

$$N_s = \frac{60}{2\pi} \Omega = \frac{60f}{p} \quad (2.1)$$

f - es la frecuencia de la red en Hz.

Ns- velocidad síncrona.

p- pares de polos.

Observando la figura 2.3 se introduce el concepto de polo. En el esquema, las zonas de entrada de las líneas del campo magnético corresponden al polo norte de éste, y las zonas de salida, que deberían corresponder al polo sur, se situarían a 180 grados. El número de polos viene normalizado y se pueden construir motores de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24... Y de hasta 80 polos.

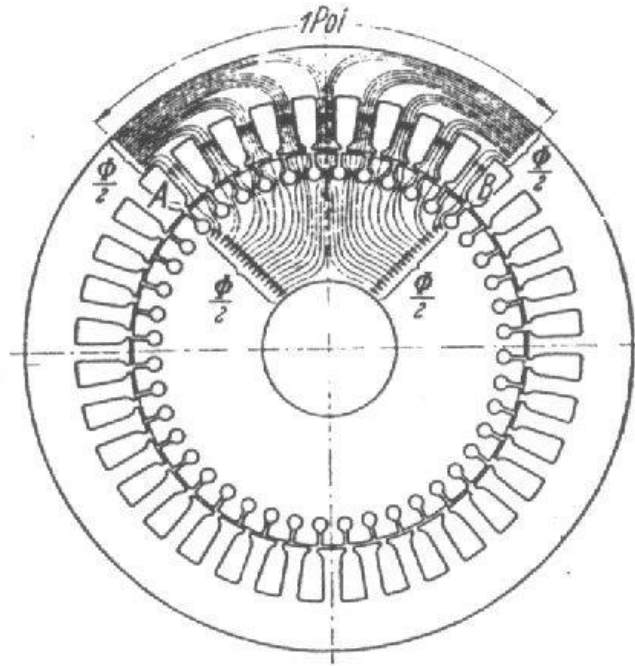


Fig. 2.3. Pares de polos.

A partir de la velocidad síncrona puede obtenerse el deslizamiento, que se define como la relación que existe entre la diferencia de velocidad del campo magnético giratorio creado por el devanado estático y del campo inducido en el rotor, y la velocidad del campo inductor creado por el estator, y su expresión sería la siguiente:

$$s = \frac{N_s - n}{N_s} [\%] \quad (2.2)$$

N_s - velocidad síncrona.

n - velocidad del motor.

La potencia absorbida por el motor es la suma de la potencia útil que proporciona (potencia mecánica) y de las pérdidas totales que se producen en todas las partes que lo componen (pérdidas mecánicas, pérdidas en el hierro, pérdidas en el bobinado del estator, pérdidas en la jaula del rotor y pérdidas adicionales). La potencia nominal se refiere a la potencia mecánica desarrollada en el eje del motor a su velocidad nominal y puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$P_N = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \cdot \eta [\text{W}] \quad (2.3)$$

U - Tensión de la red.

I - Corriente de la red

$\cos \phi$ - Factor de potencia

η - Rendimiento que se define como la relación entre la potencia útil desarrollada por el motor y la potencia total absorbida por éste.

La potencia absorbida se refiere a la potencia activa, que la definimos como la proporción de potencia que el motor absorbe de la red para transformarla en energía mecánica o calorífica. La potencia activa se calcula de la siguiente forma:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi \text{ [W]} \quad (2.4)$$

U- Tensión de la red.

I- Corriente de la red

Cos ϕ - Factor de potencia

Para crear un campo magnético, cada una de las tres fases del motor debe absorber cierta potencia que no contribuye a la potencia de salida del motor y que por tanto debe ser lo más baja posible. A esta potencia se la denomina potencia reactiva, y se obtiene de la siguiente fórmula:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \text{ [VA]} \quad (2.5)$$

U- Tensión de la red.

I- Corriente de la red

De la relación entre la potencia activa (absorbida) y la potencia aparente se obtiene el factor de potencia:

$$\cos\phi = \frac{P_1}{S} \quad (2.6)$$

El momento de giro del motor se expresa en Nm (M =Fuerza x longitud del brazo de palanca) y se obtiene a partir de la potencia y la velocidad nominal del motor que vienen expresadas de la siguiente forma:

$$M_N = \frac{P_N}{n_N} \cdot 9550 \text{ [Nm]} \quad (2.7)$$

Mediante la expresión (2.7), el momento se obtiene en función de la velocidad asíncrona, sin embargo puede también calcularse referido a la velocidad síncrona, con lo que nos quedaría la siguiente expresión:

$$M_N = \frac{P_N}{n_s} \cdot 10000 \text{ [Nm]} \quad (2.8)$$

Como en el sistema trifásico la suma de los vectores instantáneos de los vectores instantáneos de las tres corrientes es, en cada momento, igual a cero, pueden reducirse por agrupación las seis bornas o conductores, que sería, para un devanado trifásico, a tres. Esta agrupación es factible realizarla de dos formas distintas, denominadas conexión estrella y conexión triángulo:

- *Conexión estrella*: Resulta de unir los extremos finales de las tres ranuras en un punto común, llamado neutro o centro de la estrella. La tensión entre bornes es, en este caso, raíz de tres veces la de la fase, mientras que la corriente de línea es la misma que la de la fase. La conexión en estrella se simboliza con el signo Y. Un motor trifásico conectado en estrella a una tensión de alimentación de 380V, quedará sometido a 220V por fase [5]

- *Conexión triángulo*: Resulta de conectar sucesivamente los extremos de las tres ranuras, y los puntos de unión resultantes, con la red. Las tensiones en cada fase del devanado son las mismas que la de la red, mientras que la corriente de línea es raíz de tres veces superior a la de fase. El símbolo Δ caracteriza la conexión triángulo. [5]

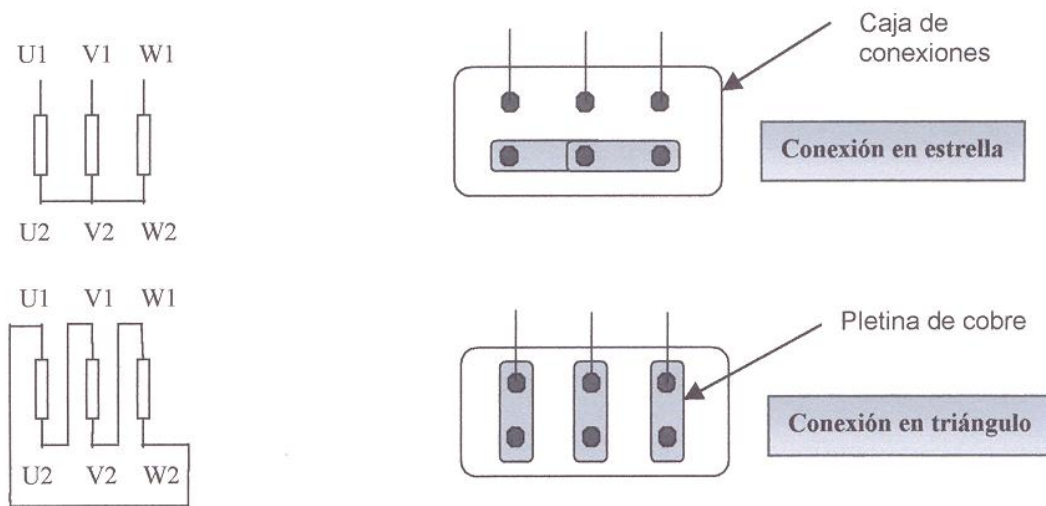


Fig. 2.4 Esquemas de conexión para las máquinas trifásicas con rotor de jaula de ardilla.

2.2 Circuito eléctrico

2.2.1 Producción de la f.e.m.

Se va a determinar el valor de la f.e.m inducida en un motor de corriente alterna. Se debe suponer que el sistema inductor produce un flujo giratorio de p pares de polos e inducción B senoidalmente distribuida en el entrehierro, que avance a una velocidad constante v . Según la fórmula $e = Blv$ (l =longitud del paquete de chapas), la f.e.m inducida, en cada lado de bobina seguirá una ley de variación senoidal en el tiempo, a razón de p períodos por cada revolución del inductor, y con ello la frecuencia f (en Hz) si la velocidad de giro es de n rev/min, se obtendrá un valor de:

$$f = \frac{pn}{60} \quad (2.9)$$

Suponiendo concentrado y bobinado de trabajo en una sola bobina de N espiras y anchura o paso diametral (igual al paso polar) las f.e.m inducidas en los $2N$ conductores de las ranuras se suman en fase para dar la f.e.m total E de la bobina:

$$E = 2N \frac{bm}{\sqrt{2}} l v \quad (2.10)$$

En la cual, como suele hacerse para las máquinas de corriente alterna, E viene calculada en su valor eficaz y Bm viene expresada por su máximo valor.

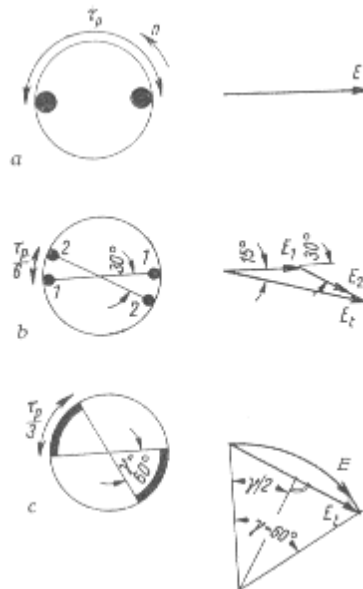


Fig. 2.5 F.e.m de los devanados concéntricos y distribuidos.

Cada segundo recorre el campo el trayecto $2\tau_p$ de un doble paso polar f veces, de modo que la velocidad $v=2f\tau_p$. Con $B_m = \pi/2B_{med}$, siendo B_{med} el valor medio de la inducción correspondiente a una semionda senoidal,

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N (B_{med} \tau_p l) = 4.44 f N \phi \quad (2.11)$$

Φ - Flujo en el entrehierro por polo.

La expresión resultante para la f.e.m rotatoria es, en definitiva, la misma que para los transformadores. La distribución senoidal de la onda móvil de inducción provoca en la bobina un flujo alterno de variación senoidal en el tiempo y cuyo valor máximo queda reflejado de la siguiente manera $\phi_m = \phi$.

De hecho, el devanado de trabajo se encuentra distribuido entre varias bobinas simples a lo largo de cada paso polar; en el caso de un motor monofásico, cubriendo por lo general, 2/3 del paso en cuestión (120° eléctricos), mientras que en las máquinas trifásicas el bobinado de cada fase se extiende sobre 1/3 del paso de cada polo (60° eléctricos) (figura 2.5.a).

Teniendo en cuenta esta distribución espacial de las bobinas individuales, las f.e.m inducidas en ellas, aún perteneciendo a la misma fase, se hallan desfasadas entre sí en el tiempo, y la suma que resulta de la composición vectorial de las mismas da un valor inferior al que se obtendría con un devanado concentrado, según puede verse en la figura 2.5

El coeficiente de reducción (ξ_d) es lo que se llama factor de distribución, y la expresión de la f.e.m total por fase toma entonces la forma $E f \xi N \phi d = 4,44$.

Antes de proceder al cálculo de este coeficiente cabe destacar un aspecto importante, y es que su valor es independiente de la forma en que se conectan los conductores de las ranuras de un polo con los del polo próximo. Por lo tanto, esto mismo es válido para devanados imbricados, como el de la figura 2.6.a, que concéntricos (figura 2.6.b), es decir, que resulta independiente de la forma de las cabezas de bobina. La razón reside en que el orden de sumando no altera la suma, aunque esta suma sea vectorial.

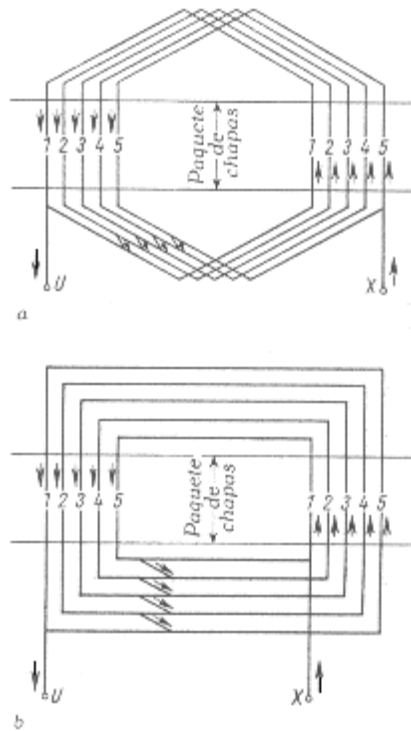


Fig. 2.6 Devanado de bobinas iguales a) y desiguales b).

2.2.2 Relación de transformación

La relación de transformación de una máquina de inducción sigue unos patrones muy parecidos a los de un transformador, sin embargo, se debe tener en cuenta que poseemos diferentes fases y bobinados en el rotor y estator.

Se debe suponer que el bobinado del rotor de una máquina está constituido por z_2 conductores distribuidos uniformemente entre n_2 ranuras y m_2 fases con un factor de bobinado ξ_2 .

Si imaginamos que este bobinado del rotor lo sustituimos por otro idéntico al del estator (en lo que a número de conductores y fases se refiere) con z_1 conductores, m_1 fases y factor de bobinado ξ_1 . Las f.e.m por fases, siempre y cuando estemos en reposo, resultarían ser iguales para el primario (E_1) y para el nuevo secundario (E_2'), ya que deberán estar inducidas por el mismo flujo común del entrehierro y a la misma frecuencia f_1 .

Como estas f.e.m son proporcionales a los números correspondientes de conductores activos, también por fase, llegamos a la siguiente relación a los valores primitivos del rotor:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{E_2'}{E_2} = \frac{\left(\frac{z_1}{m_1}\right)\xi_1}{\left(\frac{z_2}{m_2}\right)\xi_2} = \frac{m_2 z_1 \xi_1}{m_1 z_2 \xi_2} = r_E \quad (2.12)$$

Se va a proceder a establecer una condición fundamental en nuestro nuevo motor reducido. Ésta es que se conserve la potencia electromagnética aparente:

$$P_{em} = m_2 E_2 I_2 = m_1 E_2' I_2' \quad (2.13)$$

Por lo tanto:

$$\frac{I_2'}{I_2} = \frac{m_2 E_2'}{m_1 E_2} = \frac{m_2 m_1 Z_2 \xi_2}{m_1 m_2 Z_1 \xi_1} = \frac{Z_2 \xi_2}{Z_1 \xi_1} = r_I \quad (2.14)$$

Según se observa, la corriente del rotor referida al estator es totalmente independiente del número de fases primarias y a su vez del número de fases secundarias.

Si ahora se añade la condición de que las pérdidas por efecto Joule en el rotor se mantengan invariables:

$$P_{J2} = m_2 I_2^2 R_2 = m_2 I_2'^2 R_2' = P_{J2}' \quad (2.15)$$

Y así se llega a la relación de transformación, definitivamente, para la reactancia y la resistencia del rotor.

$$\frac{R_2'}{R_2} = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I_2'}{I_2} \right)^2 = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{Z_1 \xi_1}{Z_2 \xi_2} \right)^2 = r_\Omega \quad (2.16)$$

$$\frac{X_2'}{X_2} = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{Z_1 \xi_1}{Z_2 \xi_2} \right)^2 = r_\Omega \quad (2.17)$$

2.3 Circuito magnético

2.3.1 El campo giratorio

Al conectar el devanado estatórico de un motor de inducción a una fuente trifásica, se produce la circulación de un sistema equilibrado de corrientes. La circulación de estas corrientes por las bobinas estatóricas, simétricamente distribuidas, da lugar a la aparición de una onda de campo giratoria. Si el motor está en reposo, este campo giratorio irá barriendo las barras del rotor, induciendo en ellas una FEM.

La ley de inducción electromagnética de *Faraday* asegura sobre cualquier conductor rotórico se induce una FEM $e = l \cdot v \times B$, mientras esté cortando líneas de campo. El sentido de esta FEM se puede determinar directamente a partir del producto vectorial. Hay que tener presente que v es la velocidad relativa del conductor respecto al campo.

Como las barras del rotor presentan poca impedancia y están cortocircuitadas, la FEM inducida produce una elevada corriente por cada barra.

La circulación de esta corriente por un conductor rotórico que está en presencia del campo magnético creado por el devanado estatórico, hace que se ejerza sobre él una fuerza $F = l \cdot S \cdot \sigma \times B$.

La fuerza electromagnética ejercida sobre el conductor tiende a hacerle seguir al campo. Si el rotor puede moverse libremente, la fuerza que se ejerce sobre el mismo lo acelera haciéndole seguir al campo, pero sin llegar nunca a alcanzarlo. Esto es debido a que al ir aumentando la velocidad, va disminuyendo la velocidad relativa (que es la que induce la FEM), con lo que disminuyen la

FEM, la corriente inducida y la fuerza ejercida. Si la velocidad del rotor llegara a alcanzar a la del campo, se anularía la FEM, anulándose también la corriente inducida y la fuerza ejercida, con lo que la fricción empezaría a frenar al rotor, bajando su velocidad.

Cuando funciona como motor, la velocidad de rotor siempre es ligeramente menor que la del campo, de forma que se produzca en las barras una corriente suficientemente grande como para vencer el par resistente. En vacío, como el par de fricción es muy pequeño, la diferencia en velocidad es muy pequeña.

Si se aplica una carga mecánica en el eje, la velocidad empieza a disminuir, con lo que los conductores van siendo cortados por el campo cada vez a mayor velocidad. La FEM inducida y la corriente en las barras van aumentando, produciendo un par motor cada vez mayor. Cuando el par motor iguala al par de carga, termina este proceso transitorio y la velocidad se estabiliza en un valor ligeramente al de vacío. Como las barras presentan muy poca impedancia, una ligera variación en la velocidad relativa produce una variación importante de la corriente rotórica. Por ello, la máquina de inducción funciona siempre con velocidades muy próximas a la de sincronismo.

Si por un medio externo se consigue que la velocidad del rotor supere a la del campo, se invierte el sentido de la velocidad relativa. Esto hace que se invierta el sentido de la FEM y, en consecuencia, el de la corriente inducida y el de la fuerza ejercida. Ahora por

el contrario, la fuerza que ejerce el campo sobre el conductor tiende a frenarlo. Cuanto mayor es la velocidad relativa, mayores son la FEM, la corriente inducida y la fuerza de frenado ejercida.

En cualquier caso, la fuerza que se ejerce sobre los conductores se debe a la circulación de corrientes inducidas en los propios conductores por su movimiento relativo respecto al campo. De ahí el nombre de máquina de inducción.

Cuando la velocidad del rotor es superior a la del campo, éste frena a los conductores rotóricos, la máquina de inducción funciona como generador, absorbiendo potencia mecánica por el rotor.

En este último caso, como el devanado estatístico está siempre conectado a la red, los valores de frecuencia y tensión de la potencia eléctrica producida serán los de la propia red a la que está conectado. Por tanto son constantes con independencia de la velocidad de giro. Esto hace que el generador de inducción no precise regulador de velocidad para su motor primario. [5]

2.3.2 Flujo principal y flujos de dispersión

Como en el transformador el flujo principal es el flujo que está entrelazado con ambos arrollamientos, es decir, el arrollamiento del estator y del rotor. Su trayectoria consiste de los núcleos del estator y del rotor, los dientes del estator y del rotor, y dos veces el entrehierro. El flujo de dispersión, por su parte, abarcaría todas aquellas líneas de campo no incluidas en el flujo común a los dos arrollamientos: estator y rotor.

Físicamente existe únicamente un solo flujo en la máquina, es decir, el flujo total. La división en el flujo principal y el flujo de dispersión es necesaria ya que sólo el flujo entrelazado con ambos arrollamientos es el que induce una f.e.m en el arrollamiento secundario (rotor). La segunda razón es que las dos clases de flujo tienen trayectorias con reluctancias enteramente diferentes. Mientras que la reluctancia de los flujos de dispersión está determinada principalmente por el aire ($\mu = 1$), resultando una trayectoria de alta reluctancia, la trayectoria del flujo principal está contenida en el hierro, con un valor elevado de μ , y en el entrehierro que es relativamente pequeño con respecto a las trayectorias en el aire de los flujos de dispersión.

El hecho de que la reluctancia de las trayectorias de los flujos de dispersión esté determinada principalmente por el aire y sea además casi constante hace directamente proporcional la magnitud de los flujos de dispersión a la corriente (f.m.m) producida por éstos. Esto no se aplica al flujo principal, cuya trayectoria está situada en el entrehierro y el hierro. La magnitud del flujo principal está determinada por la f.m.m de acuerdo con la curva de saturación de hierro usada, el flujo principal no es proporcional a la f.m.m que lo produce.

Se considerarán los siguientes flujos de dispersión:

- Dispersión de ranura.
- Dispersión de cabeza de bobina.
- Dispersión doblemente concatenada.
- Dispersión de inclinación de ranura.

2.3.3 Factores de Cáster

La discontinuidad que producen las ranuras en el arco polar, reduce la superficie útil del entrehierro. Debido al hecho de que haya ranuras, la condición de flujo uniforme deja de ser cierta, ya que en los dientes se encuentra una mayor concentración del flujo del entrehierro.

El factor de Carter trata de corregir este efecto. Constituye, por regla general, una corrección muy importante, la cual fue determinada primero por Carter y posteriormente por otros varios autores que han dado diversas expresiones analíticas y gráficas para el mismo, todas coincidentes en la práctica. De todas ellas se elegirá la siguiente expresión para el cálculo de este factor:

$$K_c = \frac{\tau_\delta}{\tau_\delta + \delta - \frac{3}{4} a_\delta} \quad (2.18)$$

δ - Es la altura radial del entrehierro.

τ_δ - El paso de ranuras medido sobre el mismo.

a_δ - La anchura de salida de la ranura en el entrehierro.

En las máquinas de inducción, donde tanto el rotor como el estator están ranurados, se calcularán independientemente ambos factores para cada una de las partes como si el otro fuese liso. De esta manera obtendremos los coeficientes individuales KC1 y KC2. El coeficiente de Carter combinado se toma como el producto de ambos:

$$K_C = K_{C1} \cdot K_{C2} \quad (2.19)$$

Al tener K_c valor inferior a 1 el entrehierro quedará reducido a:

$$\delta' = K_C \cdot \delta \quad (2.20)$$

2.4 Circuito equivalente

Para analizar el circuito equivalente de una máquina de inducción conectada a la red, se puede estudiar de diversas formas. Ya que en este caso poseemos parámetros constantes, se procederá al estudio en motores de jaula de ardilla simple. Todos los valores que aparecen en estos circuitos son referidos al estator.

2.4.1 Jaula simple

El rotor de jaula simple, al ser más sencillo, permite calcular las corrientes de una manera más rápida. Mientras que en el rotor de jaula doble se debería hacer los mismos cálculos, con la salvedad de que el circuito equivalente serían considerados con dos ramas de motor.

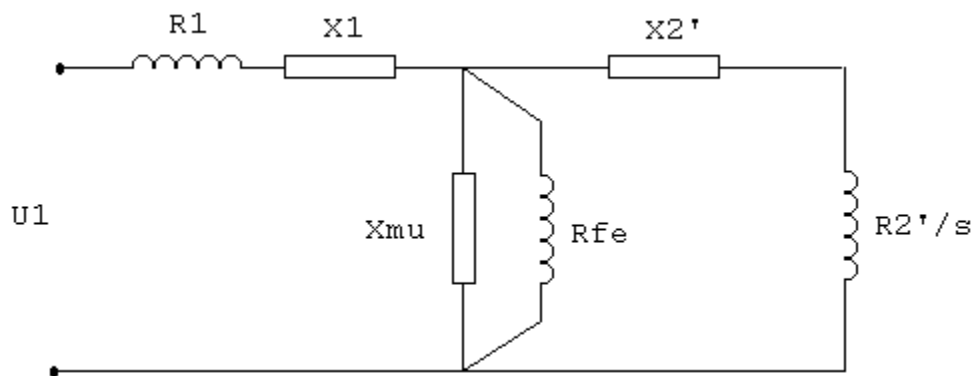


Fig. 2.7 Circuito equivalente para motor de jaula simple.

Dónde:

R_1 - Resistencia del estator.

X_1 - Incluye la reactancia de la ranura, la de la cabeza de bobina y la doblemente concatenada del estator.

X_μ - Reactancia de magnetización.

R_{fe} - Resistencia del hierro.

X_2' - Reactancia de ranura, la doblemente concatenada, la de los anillos y la de inclinación de la ranura.

R_2' - Resistencia del rotor.

En la figura 2.7, dónde se muestra un circuito equivalente de jaula simple, los valores de las impedancias presentes son totalmente constantes, siendo la impedancia rotórica $Z_2(s)$ la única que varía con el deslizamiento de la siguiente forma:

$$Z_2(s) = \frac{R_2}{s} + j \cdot X_2 \quad (2.21)$$

Esta impedancia, sin embargo, presentara un valor diferente desde los terminales del estator:

$$Z_2(s) = Z_1 + Z_{e2}(s) \quad (2.22)$$

Z_{e2} - Impedancia equivalente de la rama de magnetización en paralelo con la impedancia secundaria:

$$Z_{e2}(s) = \frac{Z_e \cdot Z_2(s)}{Z_e + Z_2(s)} \quad (2.23)$$

Por lo tanto, a tan solo a efectos de análisis, la máquina de inducción se comporta desde los terminales del estator como una impedancia que varía en función de la velocidad. Así, una vez conocido el valor de dicha impedancia es fácil determinar la corriente estatórica:

$$I_2(s) = \frac{U_1}{Z(s)} \quad (2.24)$$

Y la tensión en bornes de la rama de magnetización y de impedancia secundaria es:

$$E(s) = I_1(s) \cdot Z_{e2}(s) = \frac{Z_2(s)}{Z(s)} \cdot U_1 \quad (2.25)$$

Ahora se va a proceder a ver como resultan las corrientes que circulan por la rama de magnetización y por el rotor:

$$I_{Fe}(S) = \frac{E(S)}{R_{Fe}} = \frac{Z_{e2}(s)}{R_{Fe} \cdot Z(S)} \cdot U_1 \quad (2.26)$$

$$I_{\mu}(S) = \frac{E(S)}{j \cdot X_{\mu}} = \frac{Z_{e2}(s)}{j \cdot X_{\mu} \cdot Z(S)} \cdot U_1 \quad (2.27)$$

$$I_2(S) = \frac{E(S)}{Z_2(s)} = \frac{Z_{e2}(s)}{Z_2(s) \cdot Z(S)} \cdot U_1 \quad (2.28)$$

2.5 Balance de potencias y rendimiento.

Para estudiar el balance de potencias de una máquina asíncrona se utilizará el circuito de la fig. 2.7.

Se partirá de la ecuación de la potencia eléctrica que el devanado primario está absorbiendo de la red:

$$P_1 = 3 U_1 I_1 \cos \phi_1 [W] \quad (2.29)$$

En esta potencia, se debe considerar que hay una parte que se pierde por el llamado efecto Joule, el cual resulta de las pérdidas de calor en la resistencia R_1 , de cada fase del devanado del primario. Esto puede ser considerado como una pérdida, y se denomina como potencia de pérdidas por efecto Joule en el primario:

$$P_{cu1} = 3 I_1^2 R_1 [W] \quad (2.30)$$

Definiendo como P_c a la potencia disponible para crear el campo magnético giratorio, se llega a las siguientes expresiones:

$$P_c = 3 E_1 I_1 \cos \phi_1 [W] \quad (2.31)$$

$$P_c = P_1 - P_{cu1} \quad (2.32)$$

Esta potencia pasa íntegra al campo magnético por el principio de conservación de la energía. Sin embargo, el giro del campo determina en la corona magnética del estator y en los cuerpos magnéticos inmediatos al entrehierro la inducción de corrientes por Foucault y el fenómeno de histéresis, ya que estos cuerpos son los que puede alcanzar el campo magnético.

Estos fenómenos dan lugar a las pérdidas en el hierro del estator, que a su vez son responsables de la reducción de potencia que se encuentra disponible en el entrehierro del campo giratorio. Las pérdidas de la corriente de excitación I_{FE} vienen fijadas por las pérdidas anteriormente descritas. Su expresión es la siguiente:

$$p_{Fe1} = 3 E_1 I_{Fe} = 3 E_1 I_e \cos \phi_e [W] \quad (2.33)$$

Para obtener la potencia electromagnética transmitida por inducción al secundario debemos deducir a la potencia de campo magnético giratorio las pérdidas en el hierro (P_{FE}). La expresión queda como sigue:

$$P_a = P_c - p_{Fe1} = 3 E_2 I_2 \cos \phi_2 [W] \quad (2.34)$$

Si el rotor está en reposo y el devanado está cerrado sobre sí mismo la anterior potencia se disiparía totalmente en calor por efecto Joule, sin embargo, con el rotor en movimiento tan solo se pierde una parte de ella, la correspondiente a la resistencia del devanado rotórico. El resto de potencia que no se degrada en calor se denomina como potencia mecánica interna del motor (P_{m1}), potencia igual al producto del par interno M_1 por la velocidad angular del rotor:

$$P_{m1} = M_1 \omega [W] \quad (2.35)$$

Ahora, se desarrolla la potencia correspondiente a las pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor, ante la corriente I_2 por fase R_2 . Su expresión es:

$$p_{cu2} = 3 I_2^2 R_2 = s P_a \text{ [W]} \quad (2.36)$$

Procediendo a deducir estas pérdidas de la potencia electromagnética transmitida por inducción al secundario obtendremos la potencia que se recoge en el rotor en forma mecánica que la designaremos como potencia mecánica interna (P_{mi}):

$$P_{mi} = P_a - p_{cu2} = P_a (1 - s) \text{ [W]} \quad (2.37)$$

Aunque el campo magnético pueda originar corrientes de Foucault y pérdidas por histéresis en las chapas del circuito del rotor, las pérdidas de potencia que se producen en el hierro del rotor (P_{FE2}), en un régimen de marcha normal, al ser el deslizamiento muy pequeño provoca que la frecuencia rotórica sea muy pequeña y por lo tanto esta potencia puede considerarse a efectos prácticos, despreciable.

Si se sustituye el rotor en movimiento por otro rotor el cual este en reposo, supondrá añadir a la resistencia propia del devanado otra con el siguiente valor:

$$R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \quad (2.38)$$

En esta resistencia adicional también se disipa potencia por el llamado efecto Joule y debe corresponder a la potencia mecánica interna del motor. Y estas pérdidas tendrán el siguiente valor:

$$3 I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) = P_a (1 - s) \text{ [W]} \quad (2.39)$$

Este valor se corresponde con el valor calculado anteriormente para la potencia mecánica interna del motor.

Para definir la potencia útil del sistema debemos tener en cuenta también las pérdidas producidas tanto por rozamientos y resistencia del aire (ventilación incluida) provocadas por el giro del rotor. A estas pérdidas, denominadas pérdidas mecánicas, se deberían añadir en un análisis más exacto las pérdidas adicionales o suplementarias. Si se suponen estas pérdidas, la potencia dada como útil quedará de la siguiente forma:

$$P_2 = P_{mi} - p_m \text{ [W]} \quad (2.40)$$

Para terminar el análisis de las potencias de la máquina asíncrona se deberá tener en cuenta las pérdidas adicionales (P_z). Éstas son pérdidas residuales en el motor, y si bien son difíciles de determinar, debemos saber que se suelen producir en carga y que generalmente varían con el cuadrado del par:

$$P_1 - P_2 = \sum p \text{ (suma de pérdidas)} \quad (2.41)$$

$$P_z = \sum p - p_{cu1} - p_{Fe1} - p_{cu2} - p_m \quad (2.42)$$

Las pérdidas adicionales se pueden dividir en dos campos:

- Pérdidas del campo principal (superficiales, pulsación)
- Pérdidas del campo armónico (superficiales, pulsación, inducidas en el devanado del estator debido al rotor)

En el siguiente gráfico, se puede apreciar la distribución de pérdidas del motor asíncrono:

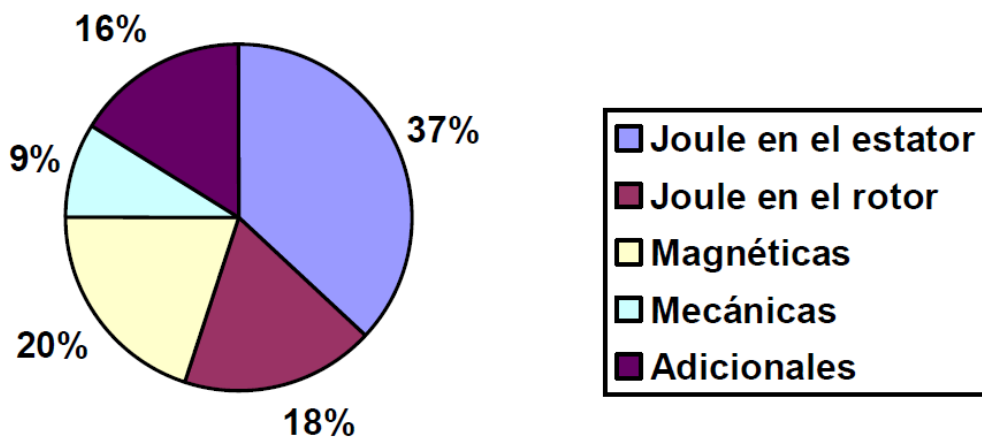


Fig. 2.8 Distribución de pérdidas.

En la figura 2.9 se muestra, correspondiéndose los elementos disipativos de potencia con el circuito equivalente, un símil hidráulico de este balance de potencia de la máquina de inducción como motor.

Para finalizar el rendimiento, η , de la máquina de inducción será:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 [\%] \quad (2.43)$$

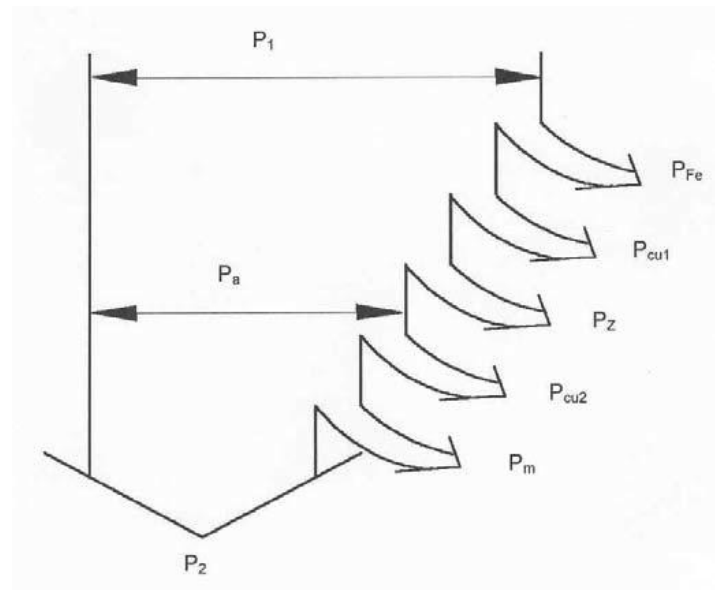


Fig. 2.9 Símil hidráulico del balance de potencias.

2.6 Par motor y par resistente.

Según el material de las barras del rotor y la forma de la sección de éste, el par de giro de un motor con rotor de jaula de ardilla puede verse influenciado. Por esta razón se llega a los rotores de corriente desplazada, que bien pueden ser el rotor de barras trapeciales o el rotor de doble jaula, el cual lleva dos barras por ranura.

Según se observa en la curva del par-motor/velocidad del motor, se diferencian varios pares especiales individuales:

- Par nominal M_N (a la velocidad nominal, n_N).
- Par máximo M_K (par máximo en marcha).
- Par de arranque M_A (par estático).
- Par de bache M_S (par mínimo entre la parada y el par máximo).

Sin embargo, hay excepciones. Si por ejemplo se escoge un motor de 6 polos que accione un compresor, no tiene ni par máximo ni mínimo. Esto se debe a que estos motores poseen un par de arranque bastante elevado y un rendimiento muy bajo.

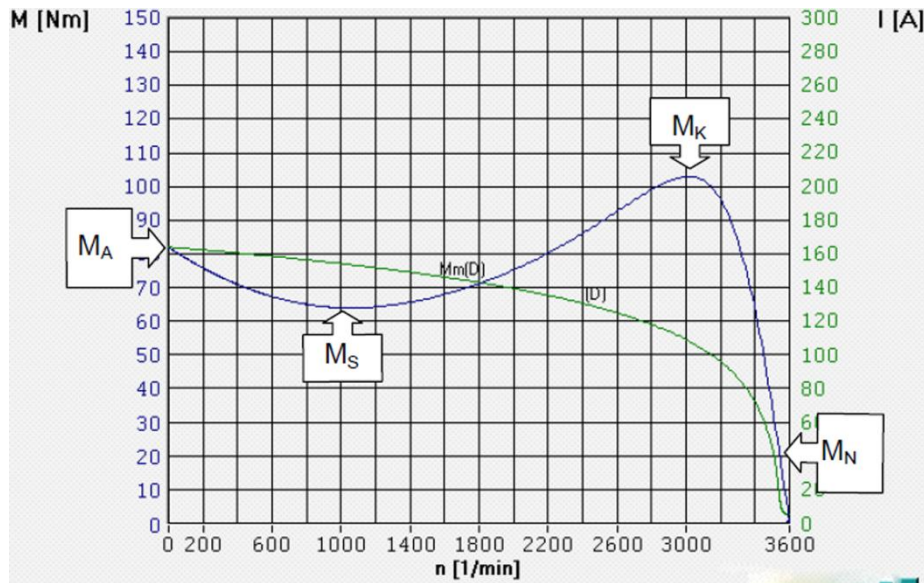


Fig. 2.10 Par motor.

Al exceso del par M desarrollado por el motor respecto al par resistente que exige la máquina operadora se le designa como par de aceleración (M_b). Tal y como viene representado en la figura 2.11.

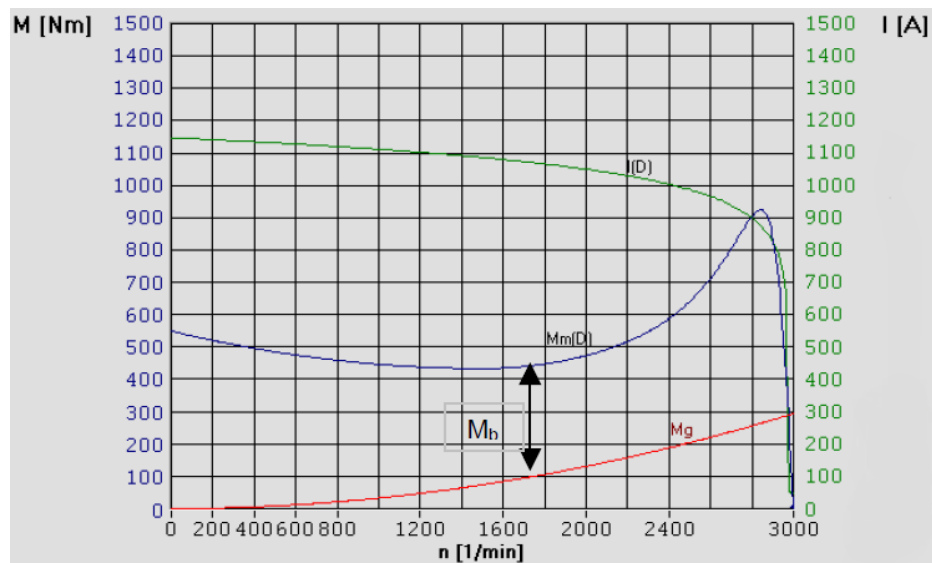


Fig. 2.11 Par de aceleración.

2.7 Arranque y aceleración.

Uno de los mayores problemas que encontramos a la hora de la utilización de máquinas asíncronas es el elevado par de arranque que se necesita para estas máquinas trifásicas, ya que la rápida aceleración del sistema motor-carga así lo requiere. Y es que este par de arranque debe superar la fuerza ejercida al par resistente de la carga y a los rozamientos por cojinetes. La corriente de arranque también puede causarnos problemas, ya que al ser muy elevada puede llegar a producir perturbaciones en las redes de distribución.

Se necesita un par de aceleración M_b para la aceleración de las masas. Por lo tanto, el par motor M debe ser mayor que par resistente entre la parada y la velocidad de régimen. Esto es debido a que solo disponemos de par de aceleración a la diferencia entre $M - M_g$. Así que el valor del par de arranque y del par de bache en el tiempo de aceleración deseado, deben corresponder a la magnitud de las masas arrastradas y al par resistente de las máquinas de trabajo.

2.8 Tiempo de arranque.

Tanto el ensayo de par-velocidad como el de intensidad-velocidad, pueden realizarse para determinar las características de aceleración del motor, así como, para considerar el comportamiento del par en función de la velocidad y como varia la intensidad desde el arranque hasta el punto de vacío o de velocidad síncrona.

Si se quiere analizar el tiempo de arranque del motor, lo calcularemos mediante el momento de inercia total GD^2 , referido al eje del motor, y también el valor medio temporal del par de aceleración, M_b .

$$t_a = \frac{GD^2}{375 \cdot M_b} \quad (2.44)$$

n – Es la velocidad en rpm.

GD^2 – es el momento total de inercia en Nm^2 .

M_b – Es el valor medio temporal del par de aceleración del motor en Nm.

Para estudiar el tiempo de arranque se ha de subdividir en tres partes, ya que no es admisible el tomar un par constante de aceleración. Estas tres partes irán de 0 a n_1 , de n_1 a n_2 y de n_2 a n_3 . La última velocidad suele elegirse al 95% de la plena velocidad. Y las superficies serán M_{b1} , M_{b2} y M_{b3} .

$$t_a = \frac{GD^2 \cdot n_1}{375 \cdot M_{b1}} \quad (2.45)$$

$$t_a = \frac{GD^2 \cdot (n_2 - n_1)}{375 \cdot M_{b2}} \quad (2.46)$$

$$t_a = \frac{GD^2 \cdot (n_3 - n_2)}{375 \cdot M_{b3}} \quad (2.47)$$

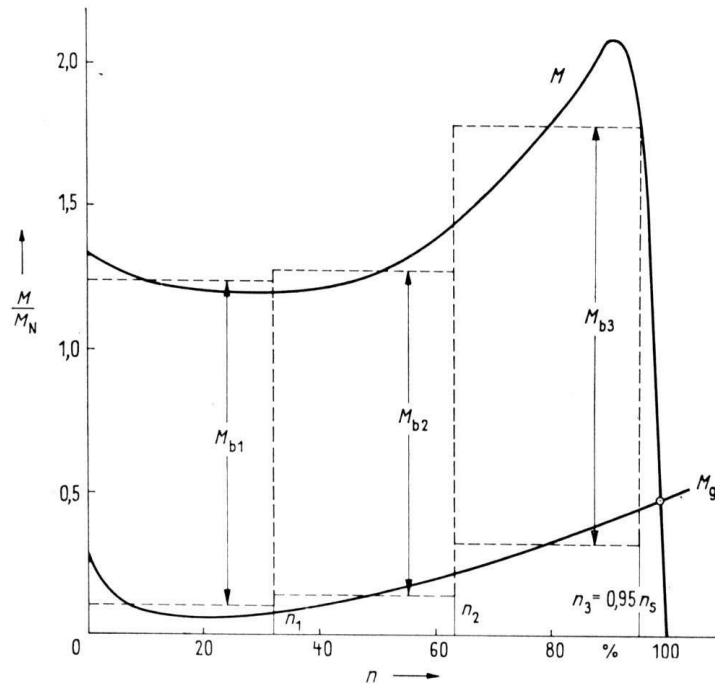


Fig. 2.12 Tiempo de arranque.

Al sumar los tres tiempo se refleja el tiempo total de arranque de $n = 0$ hasta $n = 0.95 \cdot n_s$. Teniendo en cuenta, que n_s es la velocidad síncrona.

El tiempo de arranque, ha sido calculado a partir de estas tres particiones, sin embargo, si quisiéramos estudiarlo con más particiones disminuiríamos el error del cálculo del tiempo de arranque.

2.9. Corriente y par de arranque

La corriente de arranque de los motores de conexión directa debe mantenerse siempre lo más reducida posible, ya que si se quiere conservar la red y los aparatos de maniobra no es aconsejable que se mantenga esta corriente durante mucho tiempo. Si se está ante una corriente de arranque que es demasiado pequeña, ésta repercute directamente de forma desfavorable sobre los valores técnicos de las máquinas, así como sobre los valores del par de arranque, el par máximo y el factor de potencia (fdp) nominal. Sin embargo la influencia que tiene sobre el rendimiento no es reseñable.

El par de arranque para que sea satisfactorio, debe superar el par resistente del accionamiento de la máquina así como la fricción despreciada de reposo para que pueda acelerar el accionamiento en reposo. Pero no debe producir grandes aceleraciones ya que de esa manera podemos dañar el engranaje de ésta.

2.10. Tipos de arranque en motores de inducción

A diferenciar, hay cuatro tipos de arranque:

- Conexión directa.
- Conexión estrella-triángulo.
- Conexión con transformador de arranque.
- Conexión con resistencia previa monofásica al estator.

Conexión directa:

Esta es la forma menos complicada de conectar los motores trifásicos con rotor de jaula. Aparte, también es el más usado en explotaciones industriales.

Esta forma de conectar el motor, consiste en la conexión de éste directamente a la tensión nominal de la red. Utilizando este método se suelen dar valores muy elevados tanto del par como de la intensidad, tanto, que esta última puede llegar a ser incluso diez veces mayor.

Conexión estrella-triángulo:

Este tipo de conexión consiste en arrancar el motor conectado en estrella y una vez alcanza la velocidad de régimen se conecta en triángulo. Si tenemos en cuenta la corriente de arranque, podemos observar que esta desciende a menor de un tercio en las acometidas a la red. Según se aprecia en la figura 2.13, podemos apreciar la conmutación que se produce en este tipo de arranque. Esta conmutación se produciría antes que se cruzaran el par resistente y el par motor, el cual se encuentra en conexión triángulo.

Esta conexión es muy utilizada puesto que la única manera de limitar la corriente de arranque de un motor con rotor de jaula que ya esté finalizado y en el cual no pueda realizarse ninguna modificación es la de aplicar al motor durante el arranque una tensión reducida.

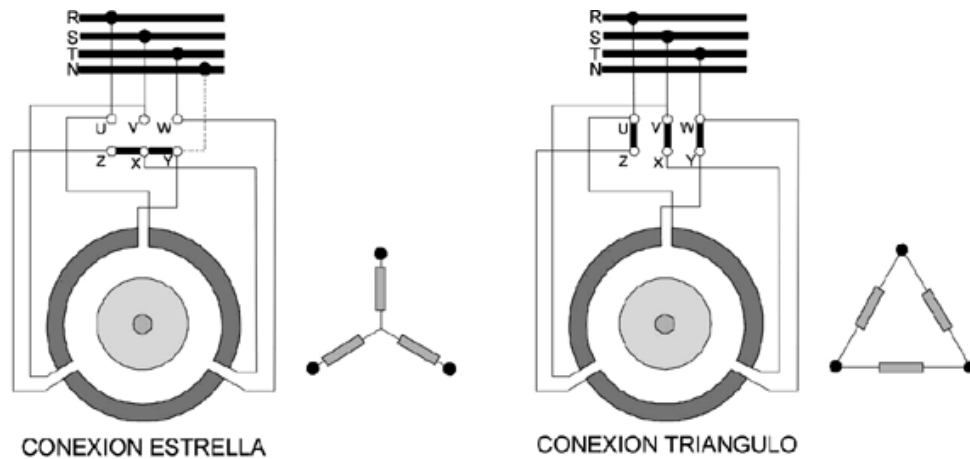


Fig. 2.13 Conexión estrella-triángulo

Conexión con transformador de arranque:

En este método, el objetivo es reducir la tensión aplicada al motor por medio de un transformador de arranque. El par de bache y la intensidad de red disminuyen de forma cuadrática.

Conexión con resistencia previa monofásica al estator:

Es el método adecuado si se desea reducir el par de arranque del motor con medio elementales, con vistas tanto al proceso técnico como a la máquina operadora. Se puede llegar a intercalar una resistencia monofásica en una de las tres acometidas del motor, la cual al terminar el proceso de aceleración se cortocircuita.

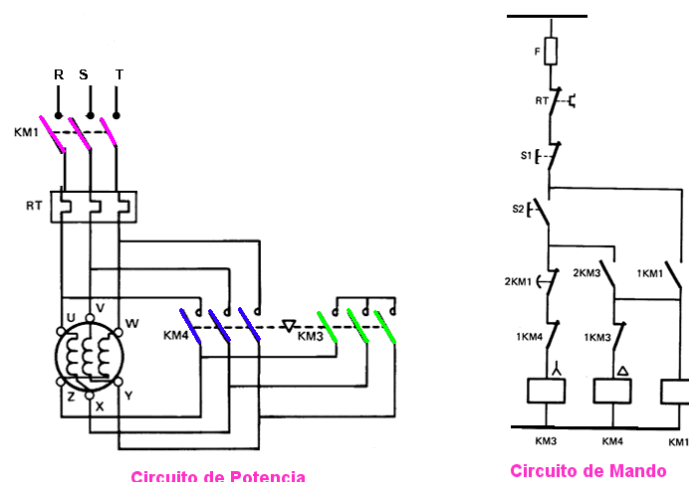


Fig. 2.14 Arranque estrella-triángulo.

CAPITULO 3:

***Descripción del procedimiento
para la obtención del
circuito equivalente según norma***

3.1 Norma IEC 60034-2-1

En el mismo sentido en el que se habló en el capítulo 1, se puede adivinar que el mundo está cambiando, y su clima también. Teniendo en cuenta la importancia del cambio climático en el planeta, el mundo de la industria se ve obligado a trabajar de manera mucho más eficiente con los motores que nos ocupan en este proyecto. Si bien, anteriormente se ha hablado de lo importante que es incorporar métodos alternativos para la consecución de energía, como las energías renovables (por ej. aerogeneradores) ahora se va a tratar el tema de medir mejor la eficiencia en los motores asíncronos. Y es que el hecho de que el 40% de la energía mundial consumida sea empleada en la alimentación de motores y que un alto porcentaje de estos sean de inducción (Fig. 3.1) ha hecho que la Comisión Electrotécnica Internacional haya introducido una serie de normas para mejorar la medida de la eficiencia en los motores asíncronos.

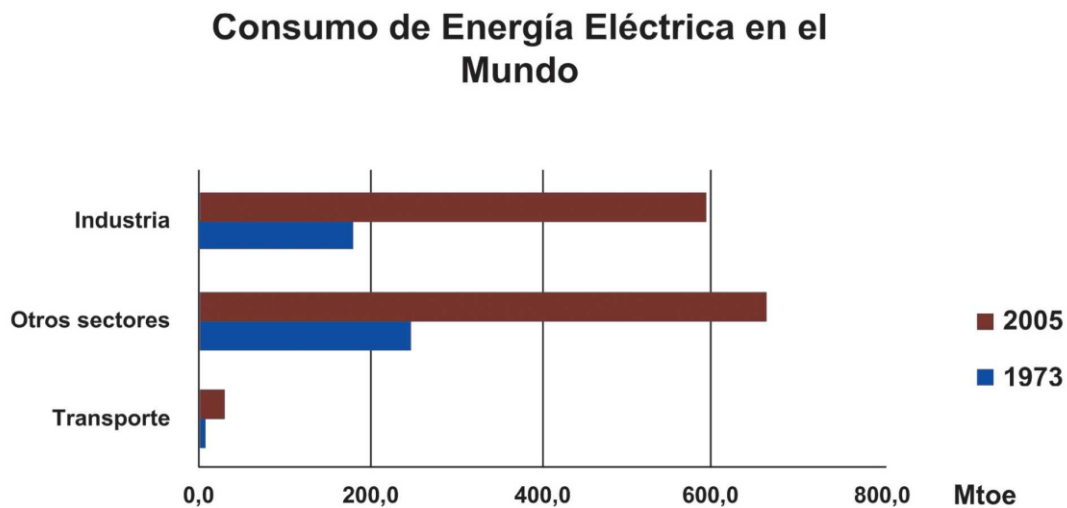


Fig. 3.1 Comparación de consumo de energía eléctrica en el mundo a finales de 2005.

Teniendo en cuenta que la eficiencia de un motor se mide como la relación que existe entre la potencia de salida y la potencia de entrada, es decir, entre la potencia mecánica y la eléctrica, en la siguiente tabla representada en la Tabla 3.I se puede observar las diferencias entre la norma IEC 60034-2-1, la usada actualmente, y la norma anterior.

Potencia nominal	Eficiencia IEC/EN 60034-2: 1996	Eficiencia IEC/EN 60034-2-1: 2007
7.5 kW, 2 polos	88.4%	87.9%
11 kW, 4 polos	90.9%	90.3%
160 kW, 4 polos	96.0%	95.4%

Tabla 3.I Comparación entre la norma IEC 60034-2-1 y la usada anteriormente.

3.1.1 Generalidades

Título: *Rotating electrical machines*.

Parte 2-1: *Standard methods for determining losses and efficiency from tests*.

Año de edición: 2007

Organismo: *International Electrotechnical Commission*.

Normas que reemplaza: IEC 60034-2 (1972) con las enmiendas A1 (1995) y A2 (1996) [7].

Cabe resaltar que el procedimiento que indica esta norma para el cálculo del circuito equivalente es prácticamente igual al citado en la norma americana IEEE Std 112 (año 2004): *IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators*.

3.1.2 Consideraciones respecto a las medidas a efectuar

Lo primero a tener en cuenta será referido a las mediciones:

- Tensión aplicada: Se toma la media aritmética de las tensiones de línea que se midan.
- Corriente absorbida: Se toma la media aritmética de las corrientes de línea que se midan.
- Resistencia: Se toma la media aritmética de las resistencias medidas.
- Frecuencia aplicada: Se admite una tolerancia del 0.3% respecto a la frecuencia nominal.

De igual forma, se tendrá en cuenta la precisión de los aparatos de medida a usar:

- Precisión de los aparatos de medida: 0,2%.
- Precisión de los transformadores de medida: 0,3%.
- Precisión en las medidas de par: 0,2%.
- Precisión en las medidas de frecuencia: 0,1%
- Precisión en las medidas de resistencia: 0,2%
- Precisión en las medidas de velocidad: 0,1% o 1 rpm.
- Precisión en las medidas de temperatura: 1°C.

3.1.3 Ensayos para la medida de la resistencia

Se debe medir la resistencia existente entre los bornes de línea que se encuentran conexiados al motor. La resistencia dependerá del tipo de conexión utilizado:

- Conexión estrella: Resistencia de fase = $0.5 \cdot$ resistencia medida.
- Conexión triángulo: Resistencia de fase = $1.5 \cdot$ resistencia medida.

La resistencia medida debe referirse a la temperatura de referencia, que es de 25 grados centígrados.

Para poder determinar la temperatura de funcionamiento a la que se debe referir la resistencia, se usa cualquiera de los siguientes métodos:

- Mediante la determinación de la temperatura en el ensayo de resistencia a plena carga.
- Midiendo directamente mediante sonda o termopar la temperatura.
- Asumiendo la temperatura teniendo en cuenta las siguientes clases de aislamiento:
 - Clase B 95 grados centígrados.
 - Clase F 115 “ “ .
 - Clase H 135 “ “ .

3.1.4 Ensayo de vacio

De esta forma, se pueden determinar tanto las pérdidas en el hierro (P_{Fe}) como las perdidas por rozamiento (P_m).

Se obtienen a partir del ensayo en vacio, como mínimo, un número de 7 tensiones diferentes, incluyendo la tensión nominal:

- Un mínimo de 4 de estas tensiones debe estar entre el 125% y el 60% de la tensión nominal.
- Un mínimo de 3 de estas tensiones debe estar entre el 50% y el 20% de la tensión nominal.
- Dicho ensayo se realizará siempre de manera que las tensiones sean descendientes, y se deberá desestimar las medidas en el caso de que la corriente se vea aumentada.
- Medir la resistencia al final del ensayo.

Las pérdidas por rozamiento, denominadas anteriormente como P_m , se calculan por la representación en una gráfica de las perdidas constantes frente a la tensión aplicada en el ensayo de vacio al cuadrado. Por lo que las pérdidas buscadas corresponderán al punto de corte con el eje de ordenadas de la recta de regresión obtenida. La representación viene expresada en la fig. 3.2.

Las pérdidas constantes, anteriormente descritas, vienen determinadas por la siguiente expresión:

$$P_{ctn} = P_{ab0} + P_{j10} \quad (3.1)$$

Dónde:

$$P_{j10} = 3 \cdot R_{fase} \cdot I_{f02}^2 \quad (3.2)$$

I_{f02} - Corriente de fase durante el ensayo en vacío.

R_{fase} - Resistencia de fase a la temperatura del ensayo en vacío.

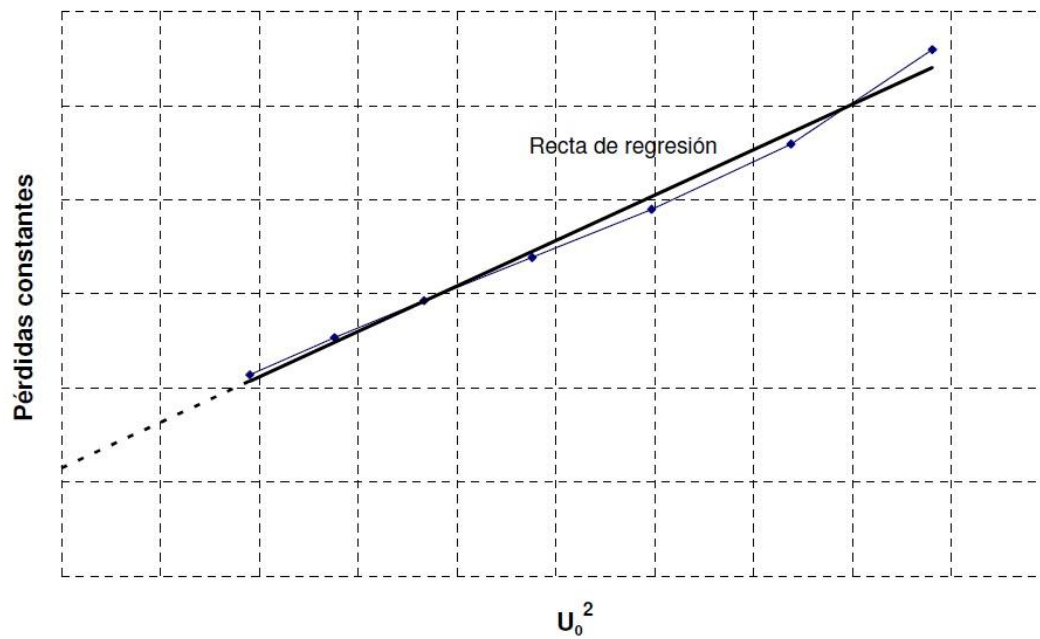


Fig. 3.2 Pérdidas constantes a partir del ensayo e vacío.

Por otro lado, para el cálculo de las pérdidas en el hierro (P_{Fe}) se representan en primer lugar (fig. 3.3), las pérdidas obtenidas a partir del ensayo de vacío en función de la tensión aplicada durante el ensayo. Según la siguiente expresión:

$$P_{Fe} = P_{ctn} - P_m \quad (3.3)$$

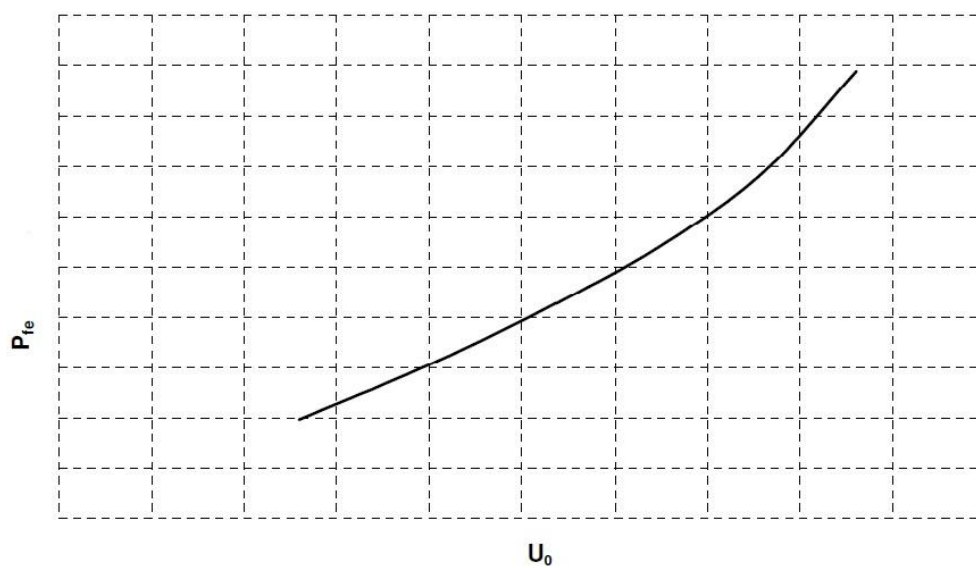


Fig. 3.3 Pérdidas en el hierro a partir del ensayo de vacío.

3.1.5 Ensayo del rotor bloqueado

Mientras el rotor se mantiene bloqueado, se aplica una corriente nominal a 3 frecuencias distintas:

- Una f alrededor del 25% de la frecuencia nominal.
- Y dos de estas f entre el 25% y el 50% de la f nominal.
- Durante el ensayo, no debe haber incrementos de temperatura mayores de 5K.
- Si no se dispone de un variador de frecuencia, se debe realizar el ensayo a frecuencia nominal.

3.1.6 Determinación del circuito equivalente

Se necesita realizar el ensayo en vacío si se quieren determinar tanto las pérdidas en el hierro (P_{Fe}) como las pérdidas por rozamiento (P_m). Para determinar el rendimiento final se deben utilizar alguno de los métodos que la norma incluye, para considerar las pérdidas adicionales.

Los parámetros del circuito equivalente son los siguientes y vienen reflejados en la figura 3.4:

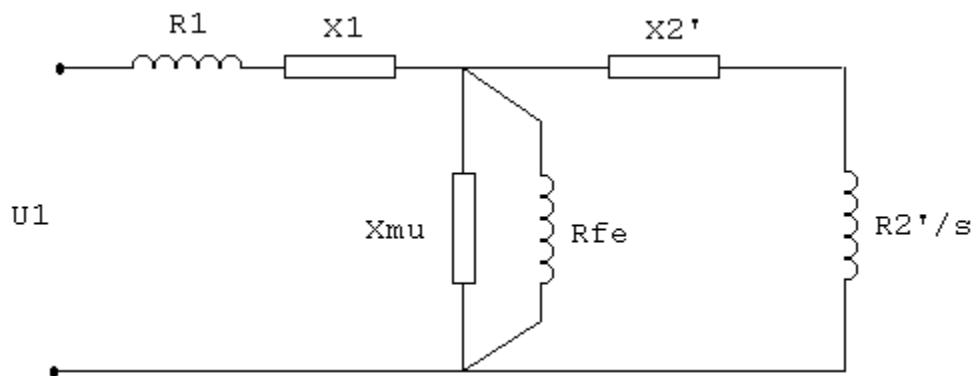


Fig. 3.4 Circuito equivalente de jaula simple.

Parámetros:

R_1 - Resistencia del estator.

X_1 - Incluye la reactancia de la ranura, la de la cabeza de bobina y la doblemente concatenada del estator.

X_μ - Reactancia de magnetización.

R_{fe} - Resistencia del hierro.

X'_2 - Reactancia de ranura, la doblemente concatenada, la de los anillos y la de inclinación de la ranura. (Reactancia del rotor referida al estator).

R'_2 - Resistencia del rotor referida al estator.

Los valores de las relaciones entre $\frac{X_1}{X'_2}$ (varía según la clase de motor) y entre $\frac{X_1}{X_\mu}$ (habitualmente se encuentra entre 0.04 y 0.08).

Para calcular la reactancia X_1 se sigue la siguiente expresión:

$$X_1 = \frac{Q_{cc}}{3 \cdot I_{1n}^2 \cdot [1 + (\frac{X_1}{X'_2}) + (\frac{X_1}{X_\mu})]} \cdot [(\frac{X_1}{X'_2}) + (\frac{X_1}{X_\mu})] \quad (3.4)$$

Q_{cc} - Potencia reactiva en el ensayo en cortocircuito.

I_{1n} - Corriente de fase nominal.

Para calcular la reactancia de magnetización X_μ sigue la siguiente expresión:

$$X_\mu = \frac{3 \cdot V^2}{Q_0 - (3 \cdot X_1 \cdot I_{10}^2)} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{X_1}{X_\mu})^2} \quad (3.5)$$

Q_0 - Potencia reactiva en el ensayo en vacío.

I_{10} - Corriente de fase en vacío.

V - Tensión de fase nominal.

Si se ha utilizado una frecuencia que no es la nominal para el ensayo en cortocircuito se debe calcular de nuevo la reactancia X_1 :

$$X_1 = X_1(\text{inicial}) \cdot \frac{f_{\text{nominal}}}{f_{\text{ensayo}}} \quad (3.6)$$

En la siguiente expresión viene indicado la reactancia X'_2 :

$$X'_2 = \frac{X_1}{X_1/X'_2} \quad (3.7)$$

Se realizará este proceso de cálculo de forma iterativa hasta que no se difiera en más de un 0.1% del valor que se haya asumido al principio del ensayo.

La siguiente expresión da la resistencia del hierro (R_{fe}):

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot V^2}{P_{fe} \cdot (1 + \frac{X_1}{X_2'})^2} \quad (3.8)$$

Para calcular la resistencia del rotor referida al estator, se sigue la siguiente ecuación:

$$R_2' = (\frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{1n}^2} - R_1) \cdot (1 + \frac{X_2'}{X_\mu})^2 - (\frac{X_2'}{X_1})^2 \cdot (\frac{X_1^2}{R_{fe}}) \quad (3.9)$$

P_{cc} - Potencia activa en cortocircuito.

Los valores de ambas impedancias se deben referir a la temperatura tomada como referencia. Si se ha efectuado el ensayo de cortocircuito a diferentes frecuencias, se debe hacer una gráfica en la cual se representa la frecuencia en función de R_2' . Se tomará como valor de la impedancia el punto de corte de la recta de regresión tomando el valor de la frecuencia igual a 0.

Para la resolución del circuito equivalente se deben seguir las siguientes ecuaciones:

$$Z_{rotor} = \sqrt{(\frac{R_2'}{s})^2 + X_2'^2} \quad (3.10)$$

Por lo tanto:

$$Y_g = \sqrt{(\frac{\frac{R_2'}{s}}{Z_{rotor}^2} + \frac{1}{R_{fe}})^2 + (\frac{\frac{X_2'}{s}}{Z_{rotor}^2} + \frac{1}{X_\mu})^2} \quad (3.11)$$

El paralelo de la rama de vacío con el rotor se define según las siguientes expresiones:

$$R_p = \frac{\frac{\frac{R_2'}{s}}{Z_{rotor}^2} + \frac{1}{R_{fe}}}{Y_g^2} \quad (3.12)$$

$$X_p = \frac{\frac{\frac{X_2'}{s}}{Z_{rotor}^2} + \frac{1}{X_\mu}}{Y_g^2} \quad (3.13)$$

Por lo tanto, la impedancia total será:

$$Z_{total} = \sqrt{(R_1 + R_p)^2 + (X_1 + X_p)^2} \quad (3.14)$$

A la hora de calcular el rendimiento, se debe calcular primero la corriente del estator (I_1) así como la del rotor referida al estator (I'_2):

$$I_1 = \frac{V}{Z_{\text{total}}} \quad (3.15)$$

$$I'_2 = \frac{I_1}{Y_g Z_{\text{rotor}}} \quad (3.16)$$

A la hora de calcular el rendimiento, se deben tener en cuenta todas las pérdidas, al igual que se habló en el capítulo anterior, la siguiente expresión refleja estas pérdidas:

$$P_z = \sum p - p_{cu1} - p_{Fe1} - p_{cu2} - p_m \quad (3.16)$$

Con:

$$P_1 - P_2 = \sum p \text{ (suma de pérdidas)} \quad (3.17)$$

Si se define a la potencia total como:

$$P_{ab} = 3 \cdot R_{\text{total}} \cdot I_1^2 \quad (3.18)$$

$$P_{\text{util}} = P_{ab} - P_{\text{perdida totales}} \quad (3.19)$$

Por lo que el rendimiento viene expresado de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{P_{\text{util}}}{P_{ab}} \quad (3.20)$$

3.1.7 Asignación de pérdidas adicionales

Si se desea incluir las pérdidas adicionales provocadas en el motor, se debe determinar a partir de los ensayos o bien a partir de la norma. Este último es el método más directo.

Según la norma IEC 60034-2-1 se determinan las pérdidas adicionales a plena carga en tanto por ciento [%] respecto a la potencia absorbida según se representa en la figura 3.5:

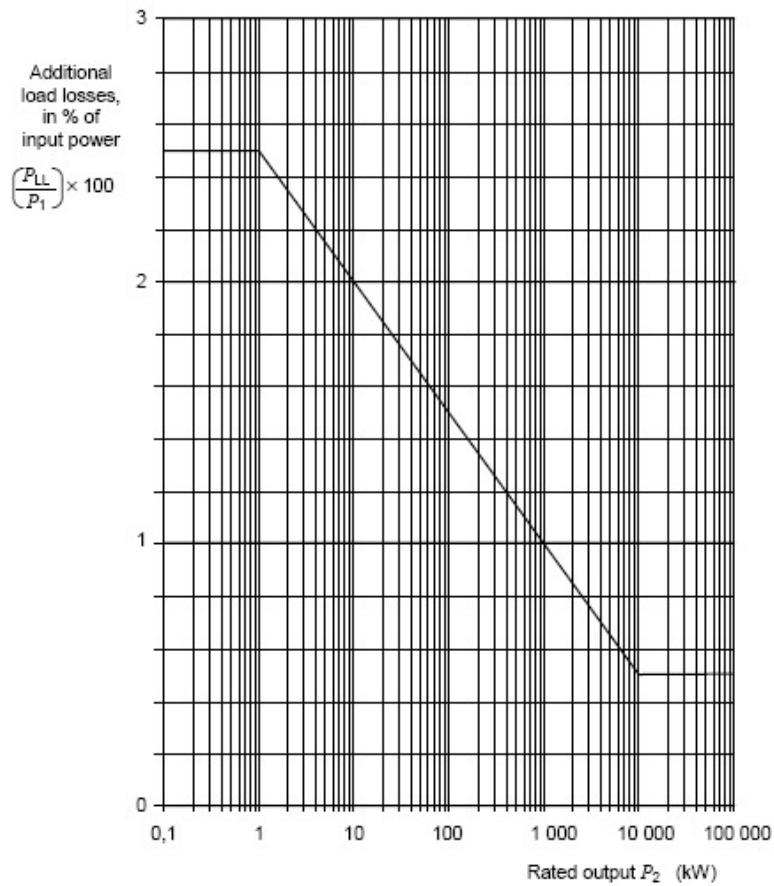


Fig. 3.5 Pérdidas adicionales según la potencia útil.

Dónde:

P_1 - Potencia absorbida.

P_2 - Potencia útil.

P_{LL} - Pérdidas adicionales a plena carga.

Como se observa en la anterior figura, existen tres tramos diferentes de la curva. Sus relaciones son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 &\text{for } P_2 \leq 1 \text{ kW} & P_{LL} &= P_1 \times 0,025 \\
 &\text{for } 1 \text{ kW} < P_2 < 10\,000 \text{ kW} & P_{LL} &= P_1 \times \left[0,025 - 0,005 \log_{10} \left(\frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right] \\
 &\text{for } P_2 \geq 10\,000 \text{ kW} & P_{LL} &= P_1 \times 0,005
 \end{aligned}$$

Fig. 3.6 Tramos de la curva de las pérdidas adicionales.

Teniendo en cuenta que I_0 es la corriente de vacío, se pueden modelar pérdidas adicionales para cargas que difieran de la nominal, a las que se definirán como (P'_{LL}):

$$P'_{LL} = P_{LL} \cdot \left(\frac{\sqrt{I_1^2 - I_0^2}}{\sqrt{I_{1n}^2 - I_0^2}} \right)^2 \quad (3.21)$$

En la siguiente tabla se observan las siguientes pérdidas adicionales, según la potencia que se disponga en la máquina, teniendo en cuenta la norma IEEE 112:

Machine rating kW	Stray-load loss percent of rated load
1–90	1.8%
91–375	1.5%
376–1850	1.2%
1851 and greater	0.9%

Tabla 3.II Tabla de pérdidas adicionales.

Para corregir estas pérdidas adicionales, si se dispone de puntos de carga diferentes al nominal, se debe realizar igual que anteriormente se ha descrito.

CAPITULO 4:
HUECOS DE TENSION

4.1 Introducción a los huecos de tensión

Desde los comienzos de la integración de la energía eléctrica, una gran preocupación para desarrolladores y gestores ha sido la calidad de la energía. Y por lo tanto, los huecos de tensión tienen una gran importancia, al influir de una manera más que notable en los equipos eléctricos que se ven sometidos a ellos. Vamos a ver unos ejemplos de los aparatos que nos interesan que se pueden ver sometidos a estos efectos y las repercusiones causadas por los huecos de tensión.

- Motores de inducción: Picos de intensidad y par, oscilaciones en la velocidad, etc. En los motores doblemente alimentados al producirse la perturbación, la corriente del rotor se eleva de manera brusca por efecto del transformador. Este hecho puede provocar que el convertidor se vea dañado.
- Transformadores: Picos de intensidad.
- Motores síncronos: Picos de intensidad y par y posible pérdida de sincronismo.
- Ordenadores: Provocan desde apagados a pérdidas de información.

Por lo tanto, se ha de saber de qué manera estos huecos de tensión pueden afectar a nuestros aparatos y saber cómo corregirlos.

Una pequeña descripción de los huecos de tensión sería la siguiente: Reducción brusca de la tensión en una fase, y la posterior recuperación de ésta. El tiempo puede variar entre los 10 milisegundos y varios segundos. La duración normal de este fenómeno se encuentra entre 100 y 600 ms. Podríamos asemejarlo a una onda cuadrada que representa un tanto por ciento de la tensión nominal.

Según la profundidad de estos huecos de tensión se podrán diferenciar tres tipos diferentes:

- Entre el 10% y el 30% (en un rango de ± 10 se considera como normal).
- Entre el 30% y el 80%.
- Superior al 80%.

Mientras que si el objeto de estudio para diferenciarlos es el tiempo se podría hablar de dos niveles diferentes:

- Entre 0.01 segundos y 1 segundo (se considerara una caída breve).
- Entre 1 segundo y varios segundos.

Si por el contrario, nos atenemos a la simetría:

- Simétricos: Las tensiones de las tres fases caen en la misma proporción.
- Asimétricos: Las caídas son diferentes en algunas de las tres fases, pudiendo subdividirse en monofásicos o bifásicos.

Los huecos de tensión que aparecen con más asiduidad son los monofásicos. Estos están provocados por el cortocircuito entre una fase y tierra. Provocados, por ejemplo, por un rayo. Sin embargo, las faltas bifásicas se dan menos, ya que se deben cortocircuitar dos fases y tierra.

Teniendo en cuenta los diagramas fasoriales de los distintos tipos de huecos de tensión se encontrarán las siguientes divisiones:

- Tipo A: Hueco Trifásico.
- Tipo B: Hueco monofásico.
- Tipo C: Cortocircuito entre dos fases.
- Tipo E: Cortocircuito de dos fases a tierra.

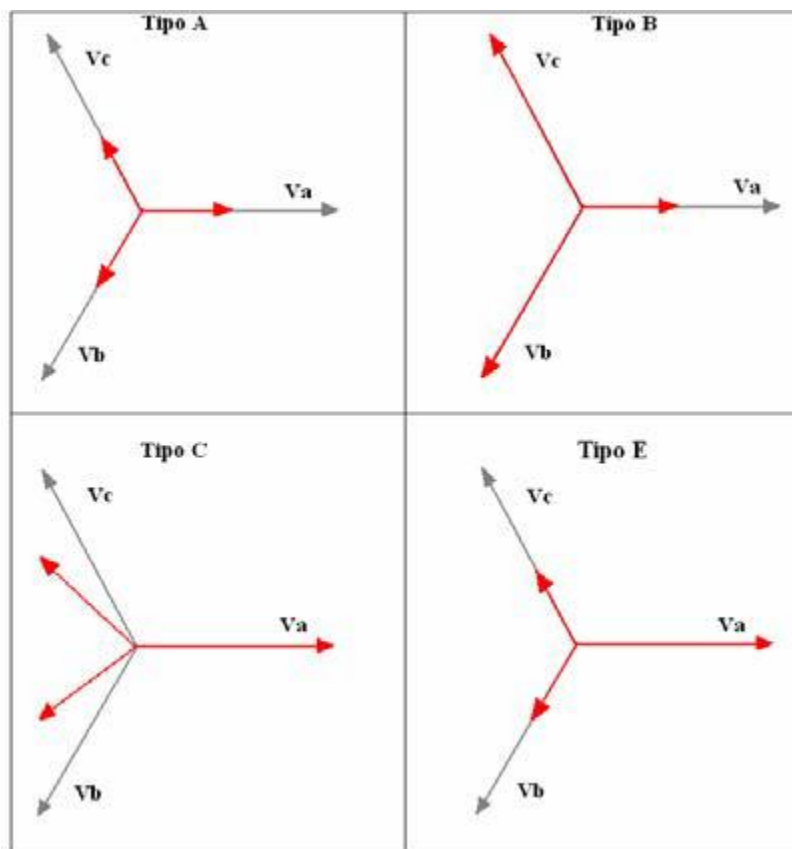


Fig. 4.1. Clasificación de los huecos de tensión en forma fasorial.

Si, por el contrario, se señalan las diferentes normas sobre huecos de tensión que existen, podemos hacer una pequeña descripción de este hecho de las siguientes formas:

Según **Norma UNE-EN 50160**:

“Disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión declarada V_c seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura de 10 ms. a 1 min. La profundidad de un hueco de tensión es definida como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión declarada. Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de alimentación a un valor inferior al 90% de la tensión declarada no son consideradas como huecos de tensión” [8].

Según **Norma IEEE Std 1159-1995**:

“Disminución de la tensión o de la corriente entre un 0.1 y un 0.9 por unidad a la frecuencia de la red con duraciones desde 0.5 ciclos hasta 1 minuto” [8].

De hecho, en el *Procedimiento de verificación, validación, y certificación de los requisitos del PO 12.3 sobre la respuesta de las instalaciones eólicas ante huecos de tensión* [8], documento que regula los ensayos a realizar en generadores eólicos en España, se define la profundidad del hueco como la caída de tensión por debajo del 85 % de la nominal, ya que la norma IEC 61000-4-30 deja libre la elección del valor a partir del cual se considera como hueco de tensión una perturbación [8].

4.2 Caracterización de los huecos de tensión

Se podrá caracterizar un hueco de tensión definiendo como una tensión residual (p) con una duración (Δt), por lo que se estaría, como se ha nombrado anteriormente, ante una onda cuadrada de una determinada duración.

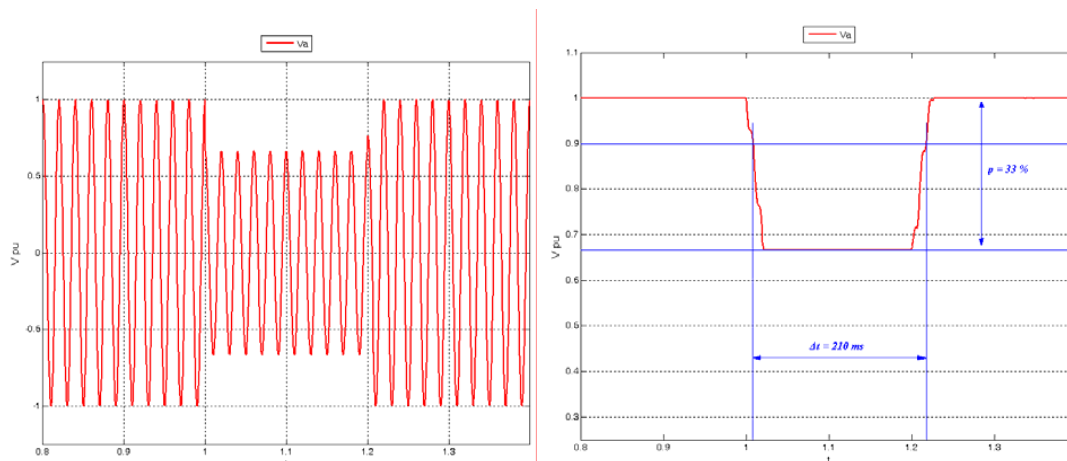


Fig. 4.2 Caracterización de hueco de tensión. V (0.33, 210)

Cuando por las diferentes fases de una línea circula una corriente demasiado grande se pueden dar estos huecos de tensión. Esto no hace sino más que corroborar lo que se explico en el capítulo anterior sobre el arranque en grandes motores de industrias, y el especial cuidado que hay que conservar en dichas acciones.

4.3 Origen de los huecos

Es conocido que la mayor parte de las líneas de transporte y distribución de la línea eléctrica son cables aéreos normalmente inductivos. Por lo tanto, hay que tener presente que siempre habrá una caída de tensión que crecerá de una manera directamente proporcional a la corriente que circule por la línea, se necesitan instalar sistemas que nos sirvan para controlar la tensión y que aseguren que el sistema trabaje dentro de los regímenes normales de tensión que necesite para su correcto funcionamiento. Estos agentes pueden ser, por ejemplo, bancos de condensadores, cambiadores de tomas de los transformadores, etc.

Sin embargo, es posible que se produzcan corrientes tan altas que, de alguna forma, puedan ocasionar unas caídas de tensión de debemos tener en cuenta. Estas caídas de tensión son los huecos de tensión. Hay dos posibles causas que pueden provocar huecos de tensión:

- Consumos muy grandes de corrientes.
- Incrementos de impedancias que afectan a la red.

La primera razón es la que habitualmente provoca más huecos de tensión, ya que si hablamos de un cambio en la impedancia suele deberse a conexiones defectuosas o cables que se encuentran en mal estado. De forma coloquial se puede denominar a estos puntos como “puntos calientes”.

Refiriéndose a parques eólicos, los generadores se suelen conectar a través del transformador principal del parque, alineas que son de alta o media tención. Por lo tanto, los huecos tienen su origen en la red de transporte. Estas son sus principales causas:

- Cortocircuitos en la red: Faltas a tierra o entre dos conductores. Son huecos denominados de corta duración, esto es debido a que con la instalación de protecciones se consigue que no pasen a ser de una mayor duración. Son provocados por caídas de rayos, arboles o tan sólo por la actuación de algún elemento de la naturaleza. Estas faltas producen caídas de tensión cuya profundidad irá decayendo en función de la lejanía de la falta.
- Conexión de grandes transformadores, Midiendo en el momento de la magnetización se puede llegar a observar como absorbe una corriente reactiva hasta 10 veces su valor nominal.
- Fallos de los reguladores de tensión instalados en los transformadores.

A continuación, sigue un análisis de la dependencia de la profundidad del hueco con la distancia a la falta.

4.3.1 Análisis de la red eléctrica ante huecos trifásicos

Debido a la complejidad de cualquier red eléctrica, se procederá a estudiar su comportamiento realizando las aproximaciones pertinentes para realizar un análisis aproximado, que de otra forma sería algo imposible. Se puede realizar otra, por lo tanto, por el teorema de Thevenin, reduciendo así toda la red a un circuito equivalente compuesta por una fuente de tensión en serie con una impedancia. Dónde el valor de la fuente corresponde a la tensión que haya en la red en el nudo a estudiar (PCC). Mientras que la impedancia será la denominada impedancia de cortocircuito de la red, ésta es perfectamente conocida por cualquiera de los operadores de las redes eléctricas.

La impedancia de cortocircuito (Z_s) es la causante de dependencia que existe entre el nivel de tensión y la corriente circulante por el nodo.

Al ser las caídas de tensión y las corrientes prácticamente iguales en las tres fases se puede simplificar a una sola en su diagrama:

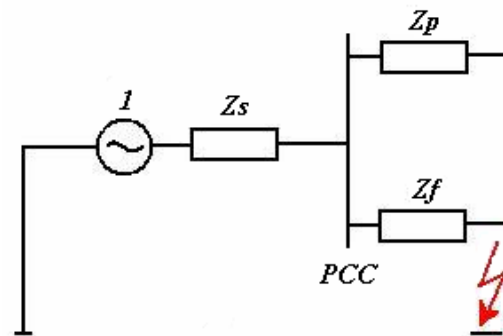


Fig. 4.3 Esquema monofásico del sistema bajo una falta trifásica

Como se puede observar, la impedancia de cortocircuito de la red es vista desde el punto de conexión común PCC. Mientras que Z_f es la impedancia situada entre PCC y el lugar en el que ocurre el cortocircuito, al que se le suma la impedancia de falta. Por lo tanto, si se tienen en cuenta estos ajustes se deduce que el esquema de la red ante un cortocircuito es un divisor de tensión. Su esquema es el que sigue a continuación:

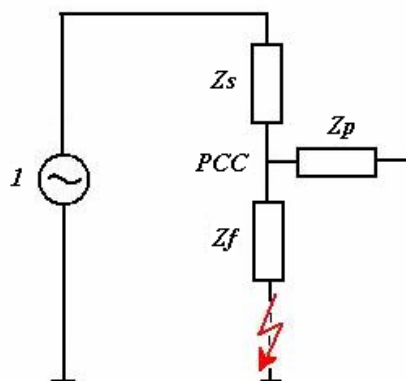


Fig. 4.4 Esquema simplificado del sistema bajo una falta trifásica.

Por lo tanto, a partir de ahora se supondrá que las corrientes que se encuentran antes de la falta son mucho menores que la corriente de cortocircuito. Este hecho supone un error asumible. De lo que se deduce que:

$$V_{PCC} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \quad (4.1)$$

Dónde la parte real de las impedancias representa la resistencia mientras que la imaginaria representa la reactancia. Al ser las reactancias mucho mayores, se puede considerar las impedancias como números imaginarios puros.

Teniendo en cuenta la expresión 4.1 se puede llegar a calcular la profundidad el hueco tan sólo conociendo las impedancias:

$$P = 1 - \text{abs} \left(\frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \right) \quad (4.2)$$

Cuanto menor sea la impedancia de cortocircuito, la profundidad del hueco será menos. De igual forma, también será menor cuanto más lejano sea el cortocircuito. Mientras que la impedancia de conexión al parque no influye apenas en la profundidad del hueco. En la siguiente figura se muestra la dependencia de la profundidad de un hueco de tensión con la distancia, a través de un registro de Red eléctrica de España [10].

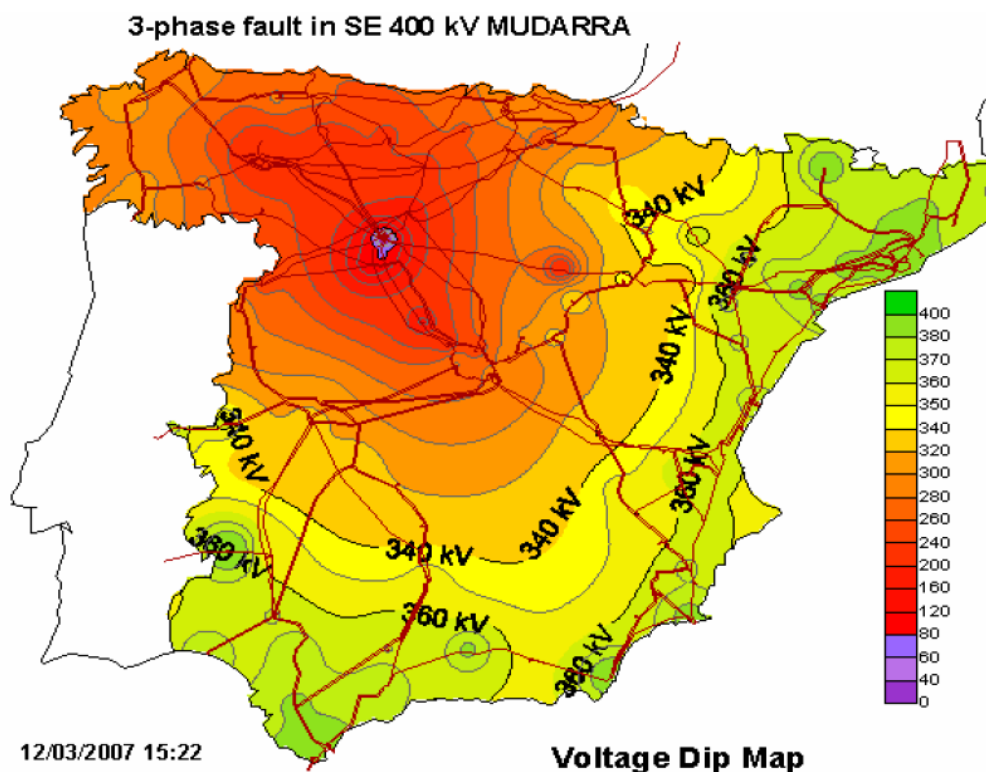


Fig. 4.5 Dependencia de la profundidad de un hueco de tensión. Fuente Red Eléctrica de España.

El esquema se muestra a continuación en la figura 4.6 es el utilizado para realizar simulaciones de los huecos de tensión:

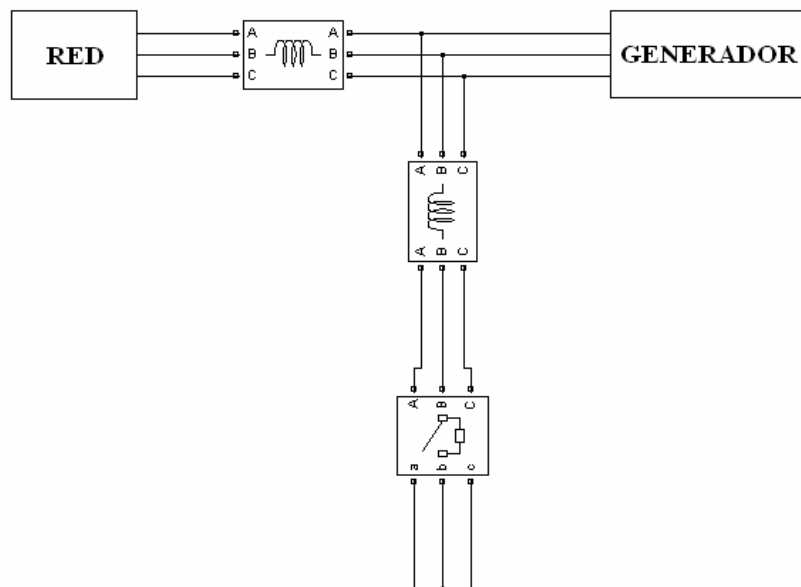


Fig. 4.6 Esquema de un generador de huecos de tensión

4.3.2 Huecos desequilibrados

Si el objeto a estudiar es un sistema ante huecos de tensión no simétricos, bifásicos o monofásicos, no es posible aplicar los principios explicados anteriormente. Este hecho, se debe a que las corrientes por cada fase en este sistema son diferentes. La alternativa a tener que estudiar las tres fases por separado se encuentra en la teoría de las componentes simétricas [11]. Según esta teoría formulada por *Charles Legeyt Fortescue*, cualquier variable trifásica desequilibrada se puede descomponer como la suma de tres sistemas equilibrados. Se pueden encontrar los siguientes casos:

- Componente directa: Se da entre dos sistemas equilibrados. Las fases siguen un orden normal: fase A \rightarrow fase B \rightarrow fase C.

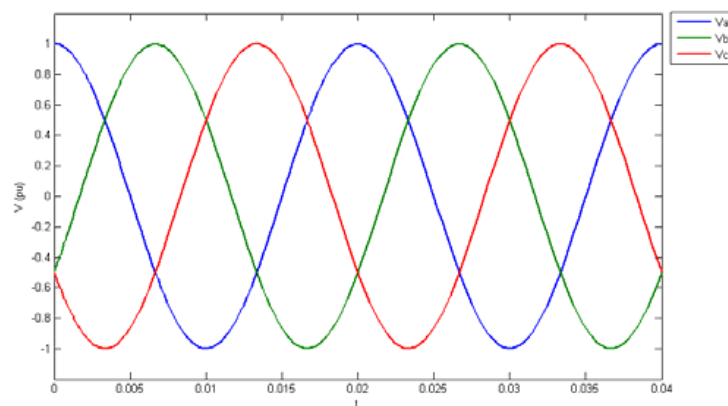


Fig. 4.7 Componente directa.

- Componente inversa: La secuencia de fases se ve alterada. : fase A \rightarrow fase C \rightarrow fase B.

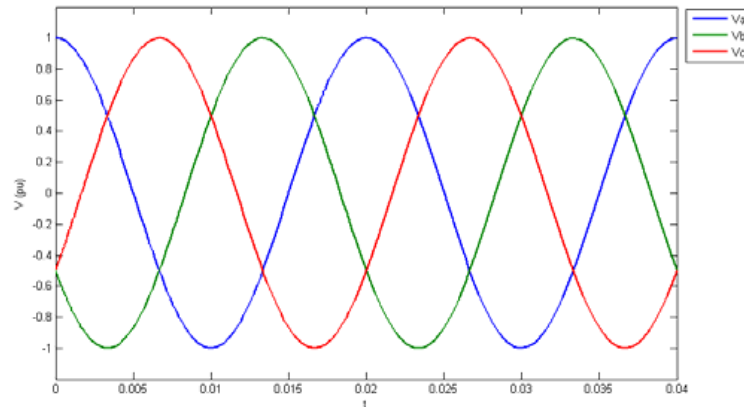


Fig. 4.8 Componente inversa.

- Componente homopolar: Las tres fases son iguales y las tres ondas tienen la misma fase.

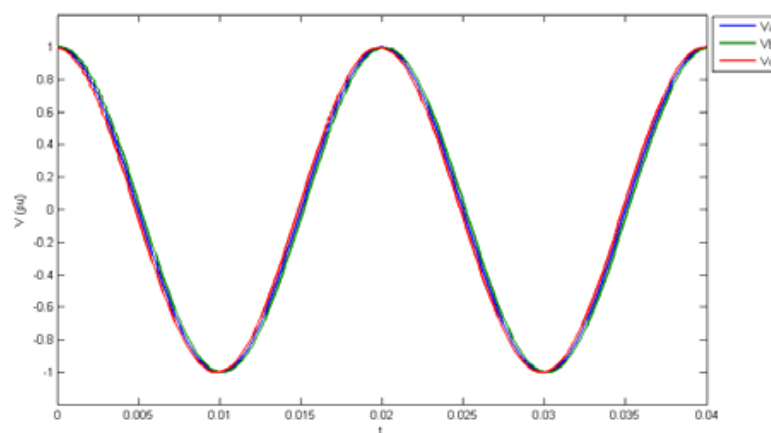


Fig. 4.9 Componente homopolar

Mientras en un sistema trifásico equilibrado sólo aparece la componente directa, las otras dos se hacen nulas. Si, por el contrario, el sistema posee dos fases invertidas sólo aparece la fase inversa. Si se está ante cualquier otro caso el sistema se puede descomponer en las tres secuencias, y el valor de cada fase será la suma del valor que la misma fase tiene en cada una de las tres componentes.

Para analizar la presencia de desequilibrios en la red, tan sólo, se hablara de los resultados que arroja M. H. J Bollen [11].

- **Cortocircuito monofásico a tierra:**

$$V_{PCC,A} = (1 - p) \quad (4.3)$$

$$V_{PCC,B} = -0.5 - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.4)$$

$$V_{PCC,C} = -0.5 + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.5)$$

- **Cortocircuito bifásico:**

$$V_{PCC,A} = 1 \quad (4.6)$$

$$V_{PCC,B} = -0.5 + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} (p - 1) \quad (4.7)$$

$$V_{PCC,C} = -0.5 + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - p) \quad (4.8)$$

4.4 Sistemas de corrección para huecos de tensión

El concepto de correcciones incluye al conjunto de medidas que se adoptan en una instalación, así como en los receptores conectados a la misma, para que su funcionamiento sea correcto dentro del entorno de la red.

Aquí, se pueden observar varios métodos para mitigar las pérdidas de tensión que se pueden dar en cualquier red eléctrica:

Inyección en serie: Si se produce un hueco de tensión este dispositivo, el cual está conectado en serie, dispone de un conmutador estático que se abre, alimentándose la carga de esta forma, con un inversor.

La alimentación de la línea de c.c. del inversor es posible debido a que se dispone de dos condensadores conectados en serie. Si se producen huecos de hasta el 50% de tensión residual, con este sistema se puede llegar a entregar la tensión nominal a la carga. Si se aumenta el número de condensadores se pueden llegar a suplir interrupciones de tensión mucho mayores. El circuito se puede observar en la siguiente figura.

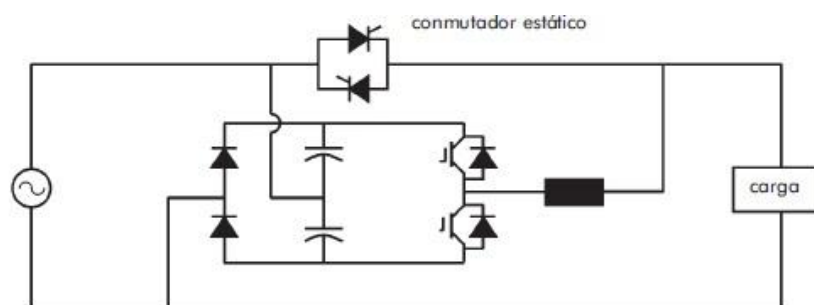


Fig. 4.10 Circuito de un inyector en serie.

Restaurador dinámico de tensión (DVR): La función de un restaurador dinámico es la de reponer la falta de tensión utilizando un transformador, que se conecta en serie con la carga. De esta forma, la carga continua conectada a la red, y mientras, el DVR determina que parte falta de la onda de tensión y des capaz de suministrarla. La energía que suple la falta de tensión ante un hueco de tensión, puede provenir tanto de la red, como de una unidad adicional de almacenamiento de energía.

Generalmente, para grandes cargas son más adecuados los segundos, es decir, aquellos que disponen de una fuente de energía externa para suplir el hueco de tensión. Dentro de este método, el tipo de unidad de almacenamiento puede variar. Se puede optar por condensadores, los cuales son muy rápidos a la hora de recargar pero con una densidad de almacenamiento bastante baja, o bien, con volantes de inercia, cuyo inconveniente es el tiempo de recarga, sin embargo, ofrecen una densidad de energía mucho más elevada que con el condensador.



Fig. 4.11 Diagrama de bloques de un DVR.

UPS (Uninterruptible Power Supply): Es decir, consiste en mantener un sistema de alimentación ininterrumpido conectado en serie con la máquina asíncrona, de esta forma se pueden cubrir faltas de tensión por un gran espacio de tiempo.

Máquina síncrona conectada en paralelo: En otro orden de medidas, se puede actuar mediante conexiones en paralelo. Una de ellas, es la de conectar una máquina asíncrona de forma que proporcione efectos parecidos a los de un STATCOM, sin embargo, a diferencia de estos no posee elementos de electrónica de potencia. Al tener la capacidad de suministrar grandes corrientes reactivas, la máquina síncrona conectada en paralelo es capaz de elevar la tensión en un 60% por un tiempo de hasta 6 segundos.

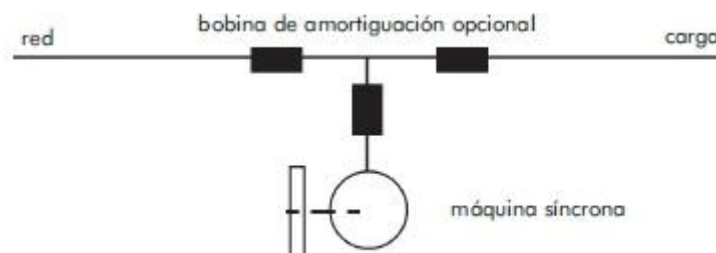


Fig. 4.12 Diagrama de bloques de máquina síncrona con volante de inercia.

Statcom: Este sistema está formado por un inyector de corriente conectado en paralelo con la carga. Su forma de actuar, es la de inyectar al sistema potencia reactiva reduciendo así los huecos de tensión que pueda sufrir la red.

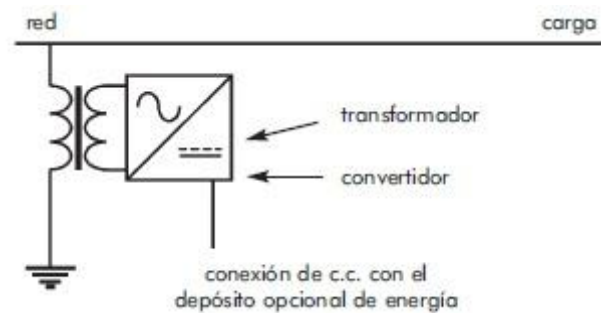


Fig. 4.13 Diagrama de bloques de un STATCOM.

CROWBAR: Se suele usar para generadores que se encuentran doblemente alimentados. Este método es el resultado de provocar un cortocircuito a la salida del rotor cuando se detecta un incremento de corriente, convirtiendo el generador en uno de jaula de ardilla. Cuando desaparece la falta de tensión se vuelve al estado normal.

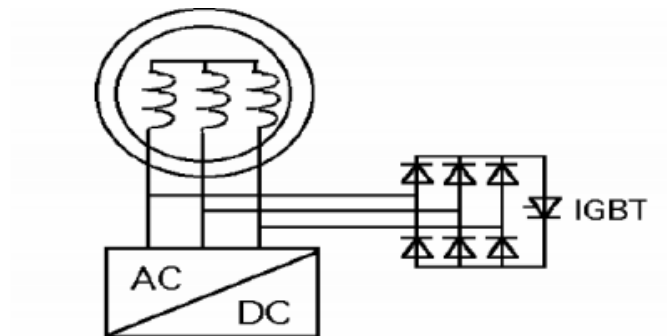


Fig. 4.14 Diagrama de bloques de un crowbar activo.

Existen muchos otros dispositivos correctores para prevenir esta situación. Se puede hablar de los sistemas SVR, o bien, del denominado PQV, pero los descritos son los que más interesan para el sistema de estudio en este proyecto.

CAPITULO 5:
CREACIÓN DE LA INTERFACE
EN MATLAB

5.1 Comparativa de software

Debido al crecimiento de aplicaciones y software creadas para entornos Windows, dónde el usuario encuentra aplicaciones fáciles de usar y que resultan familiares, y que sirven para generar códigos y ejecutarlos creando aplicaciones gráficas, el programa Matlab se ha convertido en un referente.

Matlab es un programa de cálculo técnico y científico. Aunque para ciertas aplicaciones resulta más lento que las creadas en C++ o Fortran, para ciertos programas resulta muy eficiente debido a la capacidad que tiene para aprovechar sus capacidades de vectorización.

Por lo tanto, se puede definir cómo una herramienta fácil de utilizar y que aumenta la productividad de los programadores en el desarrollo de aplicaciones técnicas. Cabe reseñar también que las últimas versiones del programa se han orientado a la creación de herramientas que faciliten el trabajo de los usuarios a la hora de la creación de interfaces gráficas.

En este sentido, Matlab posee la herramienta GUIDE (*Graphical Use Interface Development Environment*) que permite al usuario la creación de las nombradas anteriormente interfaces gráficas. Esta herramienta posee las mismas características básicas que por ejemplo Visual Basic.

Gracias a las 12 herramientas que posee el programa, así como el comando help (genera tutoriales sobre cualquier tipo de comando que use el programa) el entorno de diseño y trabajo de Matlab es muy gráfico, intuitivo y fácil de manejar.

A continuación, se nombrarán algunas características principales que hace de Matlab la base ideal para el desarrollo de soluciones a problemas matemáticos y creación de interfaces gráficas.

- Gráficos para visualizar y analizar los datos de cualquier área de trabajo.
- Lenguaje y entorno de programación interactivos con el usuario.
- Herramientas para construir GUI's.
- Integración con aplicaciones externas como C, C++, Fortran, Java, componentes COM o Excel.
- Posibilidad de importar datos desde archivos y dispositivos externos y de usar archivos E/S de bajo nivel (además de acceso a bases de datos y hardware adicional a través de productos añadidos).
- Conversión de aplicaciones MATLAB a C y C++ mediante su compilador.

5.2 Creación de una GUI en Matlab

Una de las cosas que hay que saber, es que la herramienta Matlab esta creada para que el usuario la utilice de manera intuitiva y con el objetivo de que la computación sea interactiva y automatizada. Mediante el lenguaje estructurado y las múltiples opciones que ofrece este programa, el usuario puede desarrollar algoritmos y aplicaciones sin ningún problema.

En el escritorio de Matlab, que es la ventana principal, según se ejecuta el programa se puede apreciar con todo lujo de detalles desde los directorios se estén utilizando, hasta una ventana con los comandos que se están ejecutando, o bien, se han ejecutado con anterioridad en el programa. En la siguiente figura (Fig. 5.1) se puede apreciar la vista más general de este programa:

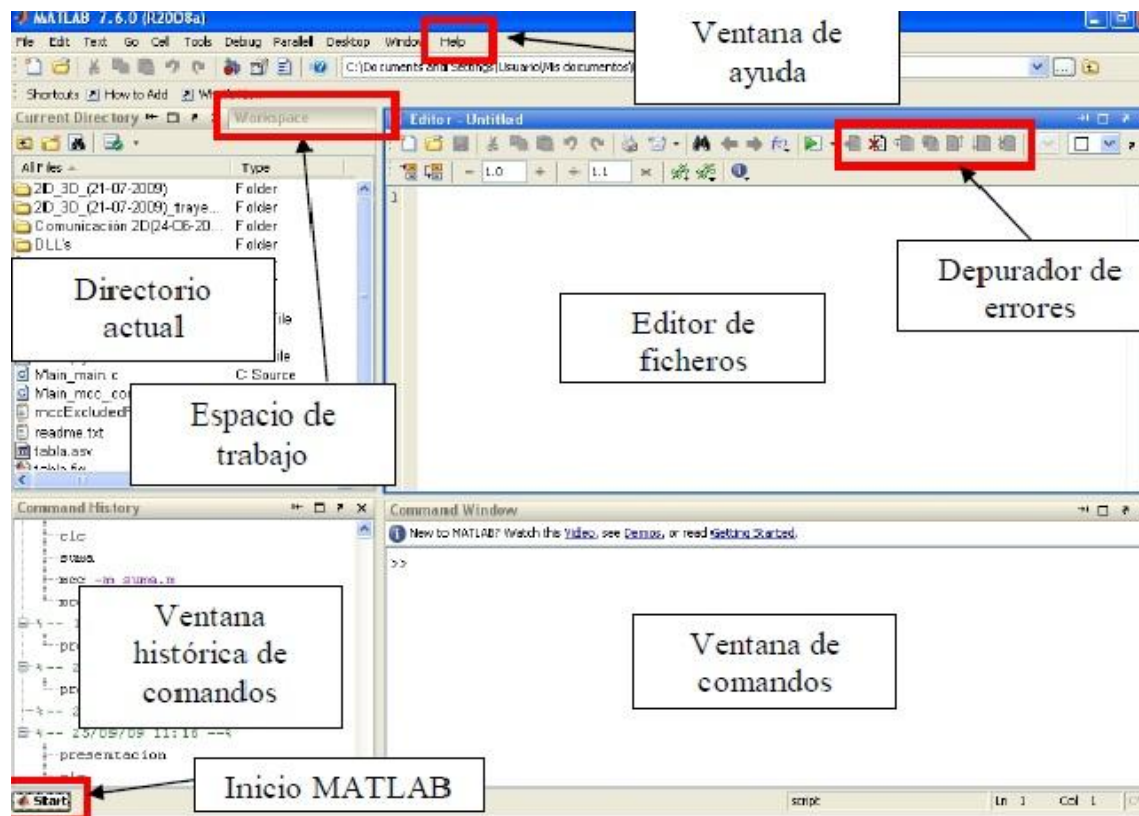


Fig. 5.1 Ventana principal de Matlab

Uno de los muchos apartados en los que destaca la herramienta matemática de Matlab, es en la creación de GUI. La creación de estas GUI's no es más que la de una creación de objetos con unas determinadas variables o parámetros para poder realizar de forma fácil y sencilla las aplicaciones que uno necesite.

A la hora de usar GUIDE se obtienen dos archivos:

- Un archivo FIG el cual contiene la descripción de los componentes que contiene la interface.
- Otro archivo M. En este archivo vienen las funciones y los contenidos de la aplicación así como los *Callbacks*.

Se define un *Callback*, cómo a la acción que desarrolla un objeto que se encuentra en la interface cuando el usuario la aplique. Es decir, la función que desarrolla un cierto botón que pulse el usuario.

La manera de empezar con una creación de una GUI es la siguiente:

Primero, a la hora de abrir la ventana de Matlab, se debe abrir un archivo pinchando en la parte superior izquierda (*File*). Acto seguido se selecciona el apartado GUI. Como se muestra en la figura 5.2:

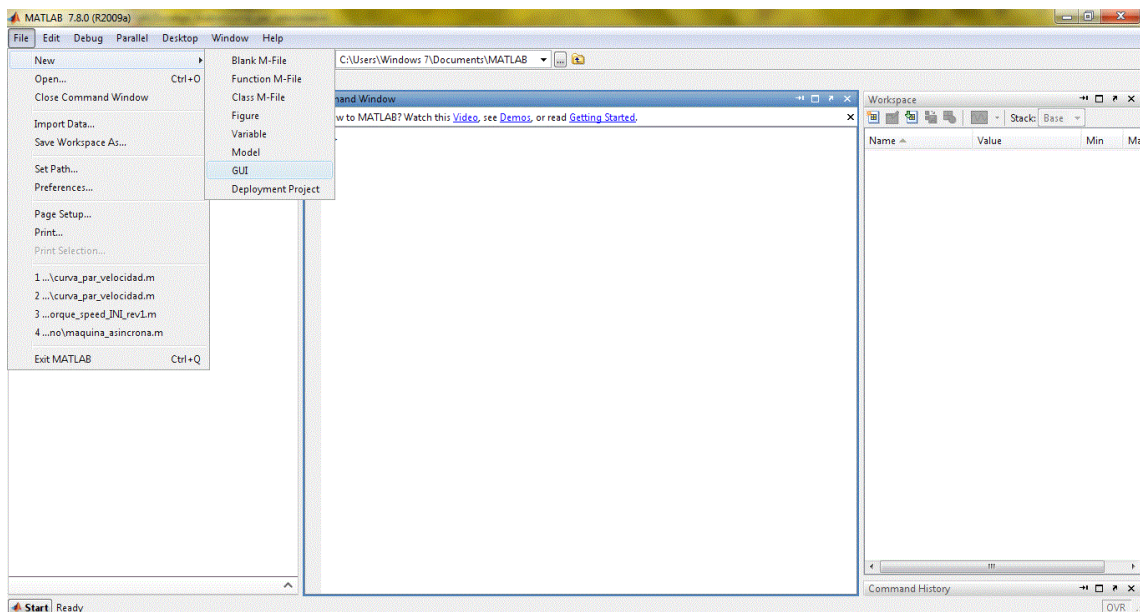


Fig. 5.2 Creación de una GUI en Matlab.

Al realizar esta acción aparecerá un apantalla de dialogo por defecto, en la que el programa nos pregunta si hay que crear una GUI totalmente nueva, y por tanto totalmente en blanco (es decir, sin ningún *uicontrol*) o bien, se va a abrir una GUI que posea ya los *Uicontrols*. En esta pantalla se selecciona la GUI en blanco, como se muestra en la figura 5.3.

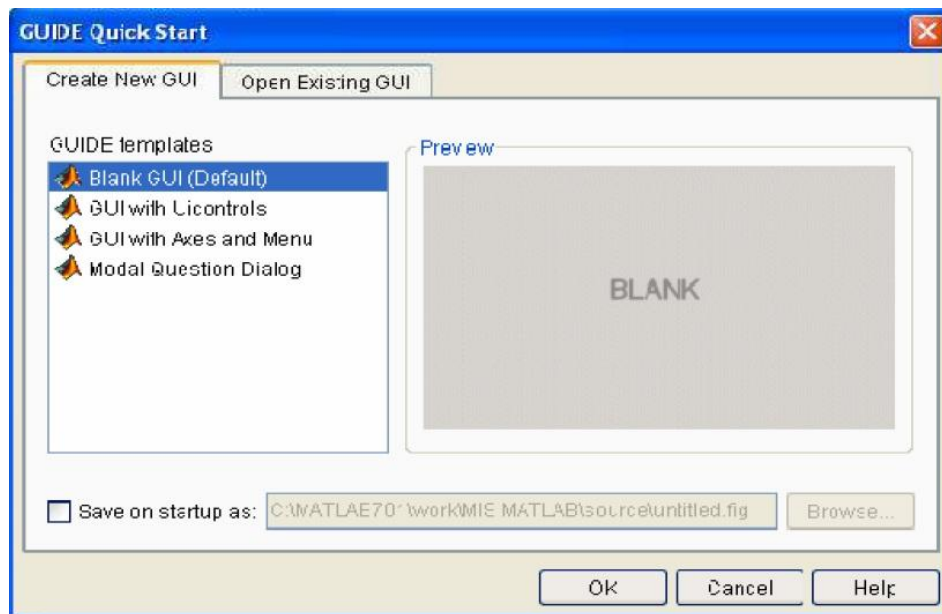


Fig. 5.3 Selección del tipo de GUI.

No obstante, hay que reseñar que si necesitamos abrir una GUI creada con anterioridad, se debe seleccionar en el desplegable de la parte superior *Open existing GUI*. Después de elegir el directorio en el que se quiere guardar nuestra interface, se puede empezar a trabajar sobre ella. En este caso para empezar se ha generado una GUI con el nombre de *untitled*, ya que tan solo es un ejemplo.

Posteriormente, si se le quiere cambiar el nombre, tan sólo sería eligiendo en la opción *save as* y poner el nombre elegido, en este caso será *interface1*. En este momento, se habrán creado los dos tipos de archivos vistos anteriormente. En el primero con extensión *.m* y tipo *function* se encuentra la programación necesaria para la inicialización de una GUI. Este código se da por defecto por el programa y viene reflejado en la siguiente figura Fig. 5.4:

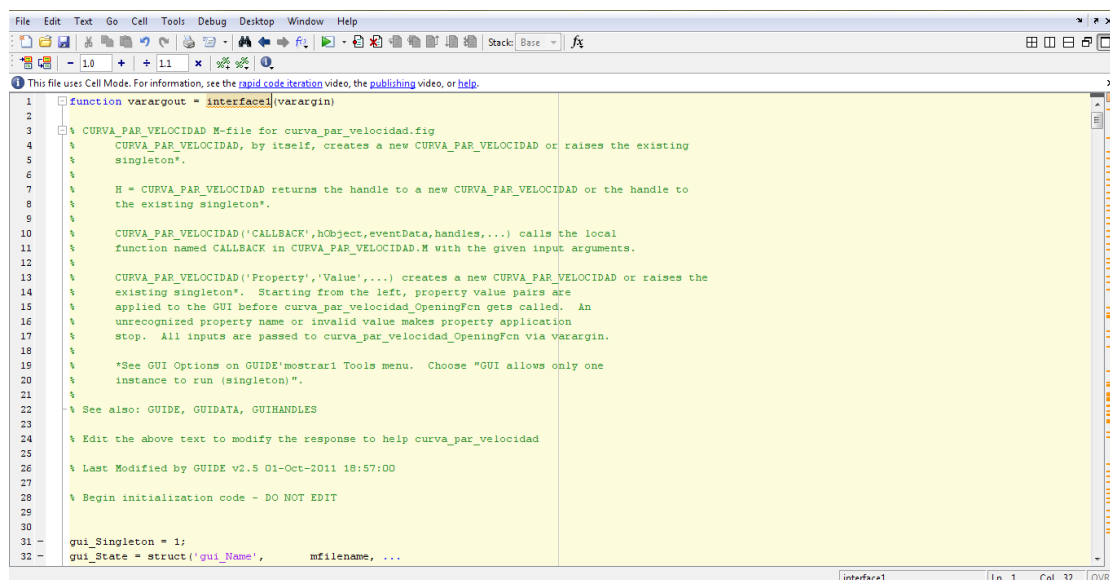


Fig. 5.4 Código inicial de la interface.

En esta pantalla se realizara la posterior programación de la interface que se desee crear, para su posterior ejecución. Asimismo, se crean un conjunto de *handles* para cada uno de los objetos que vayan apareciendo sobre la interface.

Mientras que en el segundo archivo que se genera no se observara más que una ventana sin ningún parámetro definido ni ningún cuadro de diálogos, no obstante, para seo se creó con anterioridad la interface en blanco. Si bien invocamos al primer o segundo archivo obtendremos lo que se puede observar en la figura 5.5.

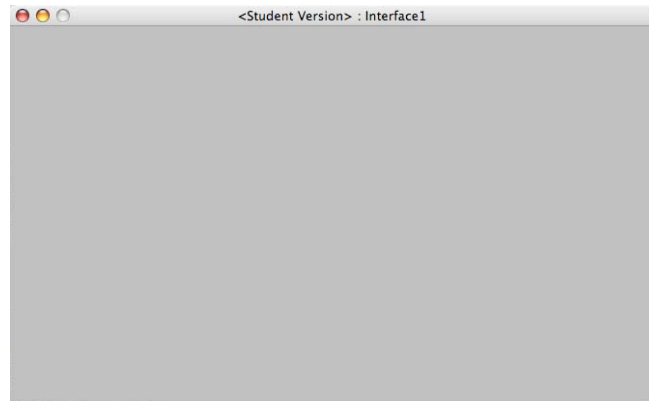


Fig. 5.5 Interface en blanco.

5.3 Partes de una GUI.

En la figura 5.6 se observan claramente de las partes de las que se dispone en una GUI:

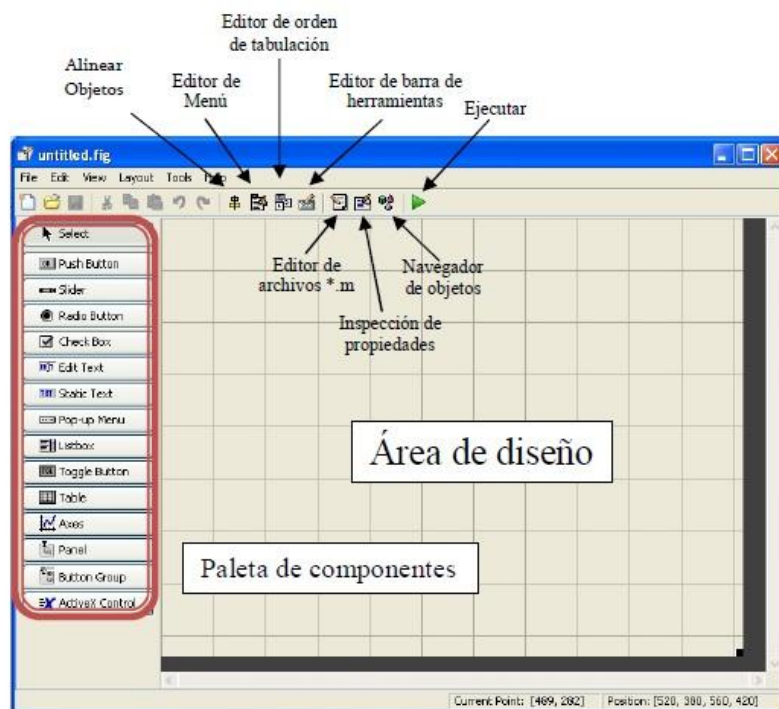


Fig. 5.6 Componentes de la GUIDE.

A la izquierda, recuadrado en rojo, se pueden apreciar los tipos de *uicontrols* que se pueden utilizar en la aplicación de Matlab. Según el usuario se podrá utilizar de diferentes formas como luego se podrá comprobar.






Los principales partes que componen una GUIDE son:

Barra de Menús: Aquí se encuentran las funciones elementales de Edición de GUIDES.

Paleta de Componentes (*component Palette*): Aquí se encuentran los *uicontrols*, estos componentes permiten seleccionar los controles (objetos) que son los que se muestran en la figura.

Área de diseño: Es este espacio de trabajo se colocarán los botones y textos estáticos así como gráficos que después se apreciarán en el resultado final de la interface una vez ejecutada.

La Barra de Herramientas: En ella se encuentran los siguientes botones:

-  **Botón de ejecución (*Run button*):** Al presionarse crea la figura de la interfaz diseñada en el *Layout Área*.
-  **Alineación de Componentes (*Alignment tool*):** Este botón permite alinear los componentes que se encuentra en el área de trabajo (*Layout Área*) de manera personalizada.
-  **Inspector de Propiedades (*Property Inspector*):** Con esta opción se consigue asignar y modificar las propiedades de cada objeto de una forma totalmente personalizada.
-  **Navegador de Objetos (*Object Browser*):** Muestra todos los objetos que se encuentran en la figura (en forma de árbol) y a través del *Object Browser* se pueden seleccionar los diferentes objetos.
-  **Editor de Menús (*Menú Editor*):** El redactor de Menú crea menús de ventana y menús de contexto.

5.4 Flujo de operación de una GUI

Existe un concepto básico en cada una de las operaciones del software con una interface gráfica o GUI, y es que el flujo de cómputo está controlado por las acciones en la interface.

En un script, el flujo de comandos está predeterminado, sin embargo, en una GUI el flujo de operaciones no lo está. Los comandos necesarios para crear una interface gráfica con el usuario se escribe en un *script* o guión, la interface gráfica invoca el guión que se ejecute, mientras la interface del usuario continua permaneciendo en la pantalla aunque no se haya terminado de ejecutar el *script*.

Los menús de la interface con el usuario, controladores deslizantes, botones, menús desplegables y el texto editable son dispositivos cuya función es la de controlar las operaciones del software. Cuando se completa la ejecución de las instrucciones, el control vuelve a la interface, y en este momento, se puede elegir de nuevo otra opción del menú. Este ciclo se repite hasta que se cierra la interface.

El control guarda un *string* que describe la acción a realizar. Cuando este *string* se invoca puede consistir en tan solo un comando o una secuencia de comandos de Matlab, o bien en una llamada a una función. Se recomienda usar llamadas a funciones, sobre todo cuando se requieren de más de unos cuantos comandos en la invocación.

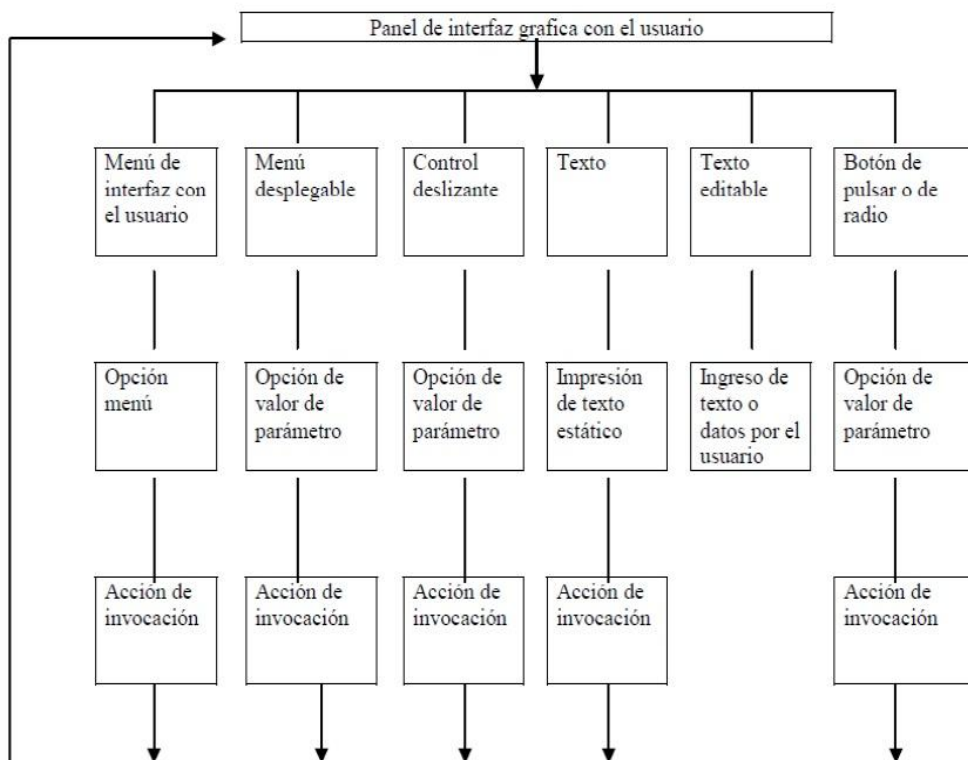


Fig. 5.7 Ciclo de operación de la interface gráfica.

En la figura 5.7 se aprecia un esquema gráfico del flujo de operación a tener en cuenta en un diseño de una GUI externa.

Al ser prácticamente imposible el describir todo tipo de situaciones que se pueden dar a la hora de la realización de una interface gráfica, por lo laborioso y pesado que resultaría, tan sólo se intenta que se entiendan los elementos básicos de una GUI. De una forma simplificada, sólo se necesitan conocer los 5 comandos básicos de una GUI, que son:

- *Uimenu*
- *Uicontrol*
- *Set*
- *Get*
- *Axes*

No obstante, lo realmente complicado será conocer el gran número y tipos de usos de estos comandos.

Se pueden diferenciar tres casos en los cuales se utiliza el sistema de objetos gráficos del que se dispone en Matlab. Estos objetos gráficos son los elementos básicos empleados por MATLAB para visualizar datos, y están organizados en una jerarquía mostrada en la figura 5.8.

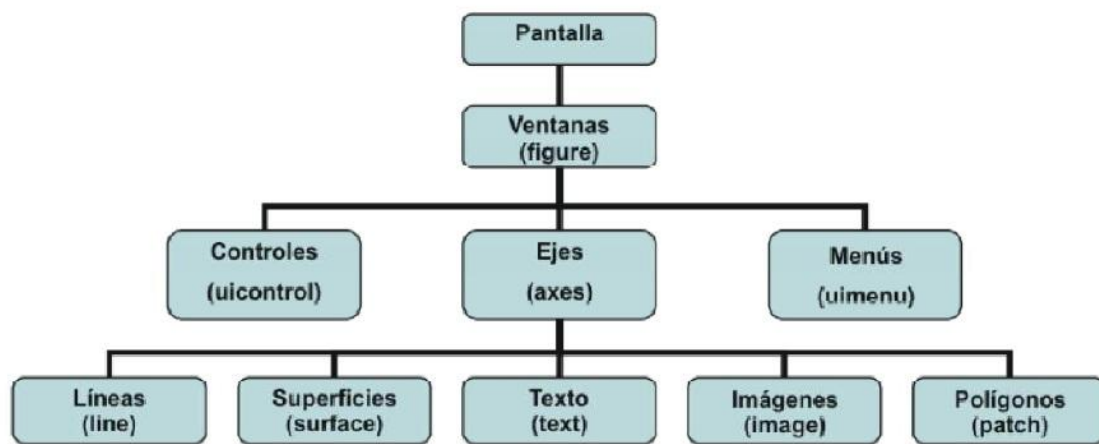


Fig. 5.8 Jerarquía de objetos gráficos de Matlab.

Se puede apreciar en la figura anterior, que el objeto principal es la pantalla y que a raíz de ella pueden estar contenidos, tanto controles como menús y ejes.

Conociendo los identificadores de los objetos gráficos, es que a través de ellos, se pueden modificar las propiedades de los objetos, e incluso borrarlos.

Estos son los principales identificadores a conocer:

- *set (id)*: Muestra en pantalla todas las propiedades del objeto al que corresponde el identificador id.
- *get (id)*: Produce un listado de las propiedades y de sus valores.
- *set (id, 'propiedad', 'valor')*: Es capaz de establecer un nuevo valor para la propiedad del objeto con identificador id. Se pueden establecer varias propiedades en la misma llamada a set incluyendo una lista de parejas 'propiedad', 'valor' en la llamada.
- *get (id, 'propiedad')*: Obtiene el valor de la propiedad especificada.
- *delete (id)*: Este elemento borra el objeto cuyo identificador es id y todos sus hijos.

5.5 Estructura de la interface

Con el fin de clarificar el proceso de construcción de la GUI, se van a enumerar los pasos seguidos para la consecución del resultado final.



Primero – Colocación de los textos estáticos “*static text*”.

Un *static text* es capaz de exhibir valores numéricos o símbolos de una GUI. El texto estático no tiene cadenas de invocación. Se puede modificar el valor del texto estático a mostrar o bien con el ejecuta el comando set desde la ventana de comandos, o bien, desde el *property inspector*, como se ha hecho en esta interface en todos los estáticos.

Su símbolo en la pantalla de la interface, para crearlo es el mostrado anteriormente, mientras que en las siguiente figura (fig. 5.9) se muestran las propiedades de uno de los estáticos (el de la R fe) usados en la aplicación.



Fig. 5.9 *Property inspector* del texto estático de la R fe.

Como se puede observar en la anterior figura, se ha elegido tanto la colocación del texto como el tamaño de la ventana de éste y, por supuesto, la fuente elegida. En el *string* se elige el nombre que aparece por defecto en la interface. Los textos estáticos no son controles, ya que no permite realizar ninguna operación con el ratón. Este proceso se ha seguido con todas y cada unas las cajas en las que parecen los nombre de las variables de la máquina asíncrona.

Segundo - Uso de los textos editables "*Edit text*".



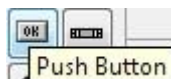
Este dispositivo permite al usuario teclear una cadena de entrada. Con el comando `str2num`, esta cadena se convertirá en valores numéricos para el cálculo de los parámetros de la máquina. En la fig. 5.10 se aprecia los parámetros modificados:

FontName	MS Sans Serif
FontSize	8.0
FontUnits	points
FontWeight	normal
ForegroundColor	
HandleVisibility	on
HitTest	on
HorizontalAlignment	center
Interruptible	on
KeyPressFcn	
ListboxTop	1.0
Max	1.0
Min	0.0
Position	[79,6 36,077 10,2 1,769]
SelectionHighlight	on
SliderStep	[0,01 0,1]
String	 130
Style	edit
Tag	resistencia_c

Fig. 5.10 Property inspector del texto editable de R fe.

El apartado *Tag*, se ha nombrado como *resistencia_c*, por lo tanto, de esta forma será como aparezca en la ventana de comandos de la interface. Mientras que el *string* será el valor por defecto de cada parámetro, el usuario lo podrá modificar en cualquier momento.

Hay textos editables sin ningún valor predeterminado, éstos recuadros lo que buscan es mostrar la información de los cálculos tanto del deslizamiento como de los pares máximos de la máquina.



3 – Uso de los botones "*push button*".

Este dispositivo permite al usuario generar una acción cuando hace click con el puntero del ratón sobre ellos. Al clickarlo su rutina de llamada se ejecuta. Por lo tanto, el uso de estos dispositivos es vital para el correcto funcionamiento de la posterior aplicación software, ya que, al presionarlos se ejecutara siempre de la misma forma la rutina programada en el archivo .m. En la figura 5.11, se aprecia cómo se le nombra al botón y eso hace que al presionarlo se ejecute la acción programada. En este caso, el botón indicara el cálculo del deslizamiento de la máquina asíncrona.


HorizontalAlignment	center
Interruptible	on
KeyPressFcn	
ListboxTop	1.0
Max	1.0
Min	0.0
Position	[89,8 25,154 14,6 3,923]
SelectionHighlight	on
SliderStep	[0,01 0,1]
String	Deslizamiento
Style	pushbutton
Tag	calcular

Fig. 5.11 Parámetros del *push button* del deslizamiento.

Según se observa en la figura anterior, el nombre que aparecerá en la GUI es el de deslizamiento, mientras que el nombre interno será el de calcular, llamado así para que tenga el mismo nombre que su rutina y al apretarlo realice la acción indicada.

Se ha procedido de igual forma para el botón de cálculo de la velocidad de “sincronismo” y del “par y potencias”.



4 – Uso de los paneles de resultados “panel”.

Con esta acción, lo que se busca es crear un apartado dentro la interface el cual se muestren los resultados. Se ha optado por crear un panel para mostrar los resultados de las potencias y así poder visualizarlos de una manera rápida y simple.

Observando la figura 5.12 se aprecia cómo se puede profundizar aún más en la creación del panel, ya que no solo se puede elegir el numero de resultados a mostrar sino tanto la forma en que queremos mostrarlo. Se ha elegido la profundidad, color y tamaño de este panel.





FontSize	8.0
FontUnits	points
FontWeight	normal
ForegroundColor	
HandleVisibility	on
HighlightColor	
HitTest	on
Interruptible	on
Position	[38 0,385 35 16,154]
ResizeFcn	
SelectionHighlight	on
ShadowColor	
Tag	potencias
Title	Panel

Fig. 5.12 Propiedades del panel.

5 – Uso de los deslizadores “slider”.



Las barras deslizadoras aceptan datos de entrada numéricos con un rango específico. El usuario tiene la libertad de mover la barra o arrastrarla colocándolo en el valor que desee. A su lado aparecen los textos editables con los valores que se hayan elegido. Para realizar esta acción se utiliza el parámetro *get*, que es capaz de guardar el valor para cada uno de las posiciones del deslizador. En la siguiente figura (fig. 5.13) se aprecia la programación del *slider* de tensión de la interface.

```

86 % --- Executes on slider movement.
87 function tension_Callback(hObject, eventdata, handles)
88 % hObject    handle to text6 (see GCBO)
89 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
90 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
91
92 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
93 %         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider
94 u1=get(handles.tension,'value');
95 u1=u1*690;
96 set(handles.tension1,'string',num2str(u1));
97 handles.u1=u1;
98 guidata(gcbo,handles);

```

Fig. 5.13 Programación del *slider* de tensión.

El valor máximo que se puede introducir será de 690 voltios, esta tensión es la elegida por ser la tensión nominal a la que trabaja la máquina de inducción.

6 – Colocación de las gráficas.

Se ha instalado una grafica en la interface mientras que el resto se abren en nuevas ventanas. En esta grafica se pueden observar la grafica del par/rendimiento respecto a la velocidad. La programación de la esta gráfica se puede ver en la siguiente figura:

```

% Figura del dibujo
h=gca;
axes(h);
plot(nm, TTe/1000, nfuncionamiento, Tutil/1000, 'r-', maxfuncionamiento, Tutil/1000, 'ro');
xlabel('Velocidad, rpm'); ylabel('Par , kN-m, Punto Funcionamiento ');
legend('Par desarrollado', 'par carga', 2);
hold on;

```

Fig. 5.14 Código para grafica par/rendimiento frente a velocidad.

7- Foto de la interface.

Se ha procedido a la instalación de una fotografía de la Universidad Carlos III dentro de la interface. Mientras se ejecute la aplicación, será visible. Su código de programación viene expresado en la figura 5.15.

```

67 % Código para que aparezcan las imágenes en la ventana
68
69 - A=imread('Peque', 'bmp');
70 - A=uint8(A);
71 - Img=image(A, 'Parent', handles.axes4);
72 - set(handles.axes4, 'Visible','off','YDir','reverse',...
73     'XLim',get(Img,'XData'),'YLim',get(Img,'YData'));

```

Fig. 5.15 Programación logo universidad.

8- Alineación de objetos.

Para poder realizar una alineación y distribución homogénea de todos los objetos que se han creado en la interface, se seleccionan los que se desean ordenar y se pulsa el icono “Align Objects” en la paleta de herramientas, situada en la parte superior de la ventana de trabajo de la GUI, desplegándose un menú contextual con variedad de opciones a elegir. En la siguiente figura (fig. 5.16) se observan las combinaciones posibles a elegir entro del programa.

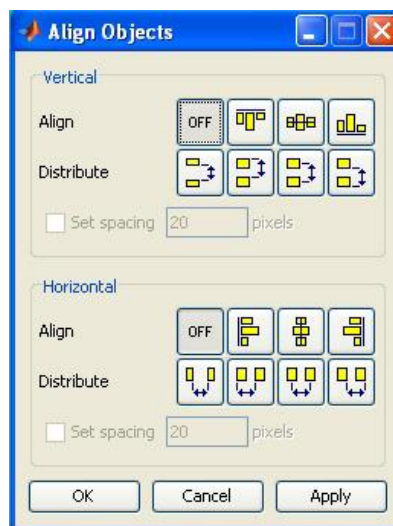


Fig. 5.16 Alineación de objetos dentro de la interface.

5.6 Implementación del cálculo numérico sobre Matlab

La aplicación permite cambiar los suficientes parámetros como para simular cualquier tipo de máquina de inducción, pero se ha creado una con unos valores por defecto, para los que se van a realizar todas las simulaciones.

Estos parámetros, pertenecen a una máquina de inducción de la casa austriaca Elin, y viene instalada en aerogeneradores NM 48. Sus características principales son las siguientes:

Marca: Elin

- Descripción: generador asíncrono de jaula de ardilla
- Tensión nominal: 690 V
- Potencia nominal: 750 kW
- Potencia aparente: 843 kVA
- Potencia reactiva a plena carga: 385 kVAr
- Número de polos: 4
- Velocidad de sincronismo: 1500 rpm
- Velocidad a plena carga: 1510 rpm
- Momento de inercia: 24 Kgm²

Los parámetros del circuito equivalente conectado en estrella son:

- Resistencia del estator: $R_s = 0.0045 \text{ Ohm}$
- Reactancia del estator: $X_s = 0.0513 \text{ Ohm}$
- Resistencia del rotor, referida al estator: $R'_r = 0.004 \text{ Ohm}$
- Reactancia del rotor, referida al estator: $X'_r = 0.066 \text{ Ohm}$
- Reactancia de magnetización: $X_m = 2.2633 \text{ Ohm}$

Con se ha introducido anteriormente en el capítulo, la implementación de la máquina de inducción se ha realizado en archivo .m de Matlab.

El primer paso ha sido el de crear el cálculo de una máquina de inducción, siempre en base al circuito equivalente descrito en el capítulo 3. En la siguiente figura se observa la programación de los parámetros principales de la máquina:


```

%Maquina asincrona
format long
ue=u/sqrt(3);
s1=(Ns-Nn)/Ns;

%Impedancias equivalentes
Zd= Rr*((1/s1)-1);
Zr= (Rr/s1)+ Xr*1i;
Xp= (1/Rc)+(1/(Xu*1i))+(1/Zr);
Zp= 1/Xp;

% Impedancia total
Zt= Rs+(Xs*1i)+Zp;

%Corriente
I1 = ue/Zt;

%potencias

S1= 3*ue*conj(I1);
reactiva= norm(S1,2);

P1 = real (S1);
Q1 = imag (S1);
fdp= cos(atan (Q1/P1));

```

Fig. 5.17 Parámetros de la máquina asíncrona.

La forma en la que se ha realizado viene del siguiente desglose de un circuito equivalente, al igual que en el capítulo tres.

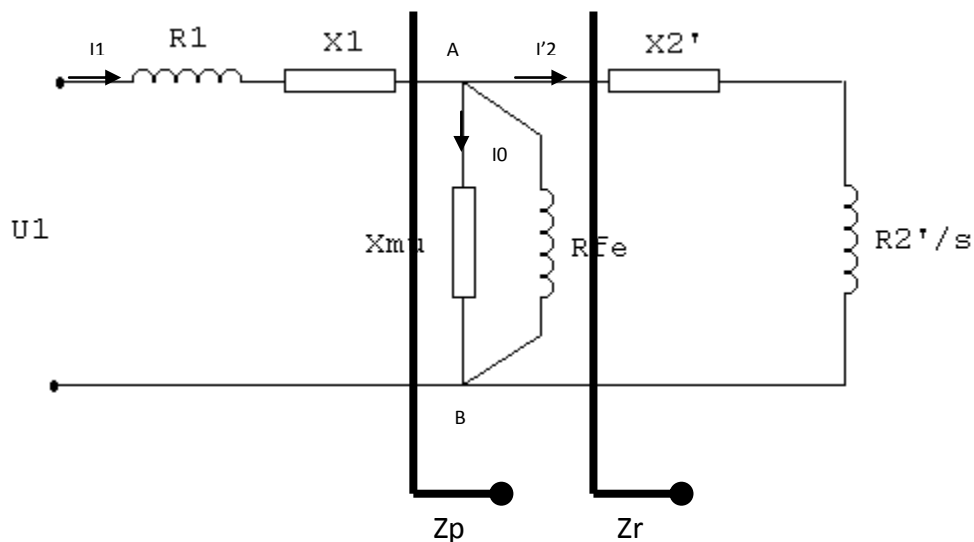


Fig. 5.18 Circuito con impedancias equivalentes.

Dónde:

R_1 - Resistencia del estator.

X_1 - Incluye la reactancia de la ranura, la de la cabeza de bobina y la doblemente concatenada del estator.

X_μ - Reactancia de magnetización.

R_{fe} - Resistencia del hierro.

X'_2 - Reactancia de ranura, la doblemente concatenada, la de los anillos y la de inclinación de la ranura.

R'_2 - Resistencia del rotor.

Para empezar a calcular las impedancias, se debe empezar por la resistencia de carga (R'_c).

$$R'_c = R'_2 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \quad (5.1)$$

Donde:

s - Deslizamiento.

A la hora de calcular el resto de impedancias

$$Z_r = \frac{R'_2}{s} + X'_2 \quad (5.2)$$

$$X_p = \left(\frac{1}{R_{fe}} \right) + \left(\frac{1}{X_\mu} \right) + \left(\frac{1}{Z_r} \right) \quad (5.3)$$

La impedancia Z_p es la inversa de X_p .

Por lo que:

$$Z_{total} = R_1 + X_1 + \frac{1}{X_p} \quad (5.4)$$

Por lo que la corriente que circula en la entrada del estator, también llamada I_1 será igual a:

$$I_1 = \frac{U_e}{Z_t} \quad (5.5)$$

La tensión (V_{ab}) y la corriente (I_0) en la rama de magnetización se derivan de las siguientes expresiones:

$$V_{ab} = Z_p \cdot I_1 \quad (5.6)$$

$$I_0 = \frac{V_{ab}}{R_{fe}} + \frac{V_{ab}}{X_u} \quad (5.7)$$

Mientras que la corriente en el rotor:

$$I'_2 = \frac{V_{ab}}{Z_r} \quad (5.8)$$

El resultado de todas estas operaciones se muestra en la pantalla principal de la aplicación.

En los resultados de las gráficas del par y la corriente frente a la velocidad se ha calculado el equivalente de *Thevenin* de la siguiente forma:

```
503 % equivalente thevenin
504
505 - RcXu=Rc*j*Xu/(Rc+j*Xu);
506 - VTh=RcXu*ue/(Rs+j*Xs+RcXu);
507 - ang=angle(VTh)*180/pi;
508 - VTh=abs(VTh);
509 - ZTh=RcXu*(Rs+j*Xs)/(RcXu+Rs+j*Xs);
510 - RTh=real(ZTh); XTh=imag(ZTh);
511
```

Fig. 5.19 Equivalente Thevenin.

A la hora de introducir los datos, se ha utilizado para los textos editables la función *get* y la función *num2str* con la cual se convierten los parámetros a valores numéricos, listos para participar en el cálculo de las ecuaciones.

```
Rs = str2double(get(handles.resistencia_s, 'String'));
```

Mientras que para introducir los datos de los deslizadores, como por ejemplo la tensión se ha usado:

```
u1=get(handles.tension, 'value');
```

```
u = str2double(get(handles.tension1, 'String'));
```

Dónde el valor viene determinado por el valor marcado en el texto editable situado debajo del *slider*, que no hace más que mostrar el resultado de la posición del deslizador. Con la primera instrucción se consigue el porcentaje de movimiento que se realiza en el “slider” mientras que con la segunda se obtiene el valor real de la tensión de línea.

Mientras que para mostrar el resultado en el panel de la aplicación, se ha hecho uso del comando *set*, al igual que para todos los resultados obtenidos. Su código de programación es:

```
set(handles.mostrar15, 'string', num2str(abs(I1), 3))
```

Con el comando “abs” se obtiene el módulo de la corriente.

5.7 Generación de ejecutables

En este apartado, se estudiarán las diferentes opciones que hay para distribuir el software gráfico creado en Matlab. Si bien, se dispone del programa instalado, la ejecución del archivo resulta sumamente sencilla. Tan sólo hay que abrirlo desde el propio directorio de Matlab, el cual se puede ver en la ventana del espacio de trabajo.

De esta manera, se podrá interactuar con la interface de la manera que se quiera, si sólo se quiere utilizar la aplicación, en principio, resulta un gran inconveniente el hecho de no tener instalado el Matlab con la licencia actualizada, ya que no se podrá utilizar la interface grafica.

Sin embargo, aquí, se va a tratar el hecho de ejecutar la aplicación en cualquier ordenador, sin tener en cuenta si se tiene instalado Matlab en el dispositivo.

Desde Matlab se pueden crear varios tipos de archivos, cómo pueden ser archivos JAVA o C, los cuales serán ejecutables desde cualquier ordenador con tan solo conexión a Internet.

En la siguiente figura (fig. 5.20) se observa las posibilidades, que se ofrecen desde esta empresa, para la ejecución de la GUI creada.

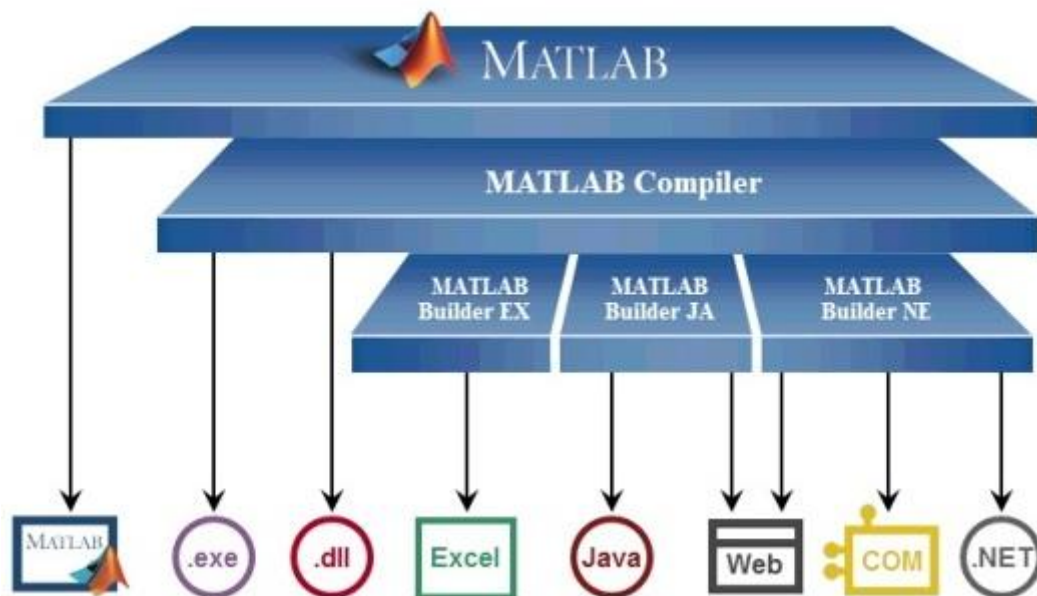


Fig. 5.20 Tipos de archivos ejecutables desde Matlab.

Según se aprecia en la figura, los archivos `.exe` y `.dll` podrán ser ejecutados siempre y cuando en el ordenador de destino se disponga del MCR de Matlab. Este MCR, no es más que el *Matlab Compiler* que ofrece la herramienta Matlab.

Con este compilador se ofrece un servicio muy interesante, y es que sin la necesidad de tener Matlab instalado, este archivo es capaz de hacer que el ordenador pueda ejecutar la interface sin ningún tipo de problema. Por lo tanto, si se quiere enviar la interface a un cliente, con tan solo incluirle en el fichero enviado este archivo, ya podrá instalar y ejecutar la GUI en cualquier ordenador.

Sin embargo, uno de los inconvenientes de que este compilador sólo funciona en los demás equipos si el creador de la interface y el creador de este archivo, coinciden. Es decir, que con un solo MCR, no se podrá ejecutar interfaces creadas por distintos programadores.

Por lo tanto, y debido a este hecho, Matlab también ha creado diferentes tipos de *builders* para entornos específicos, capaces de crear entornos web para cualquier tipo de interface, de diversas formas. Con estos *builders*, lo que se ha conseguido es crear interfaces ejecutables en lenguajes de programación y entornos web tan diversos como el JAVA, Excel o .Net.

Si se desea crear un archivo ejecutable en cualquier computador, incluyendo el Matlab *compiler* de Matlab, los pasos son muy sencillos.

Según se ve en la siguiente figura (fig. 5.22) se debe introducir en la ventana de comandos la siguiente instrucción "*deploytool*". Con esta instrucción lo que se consigue es lo siguiente:

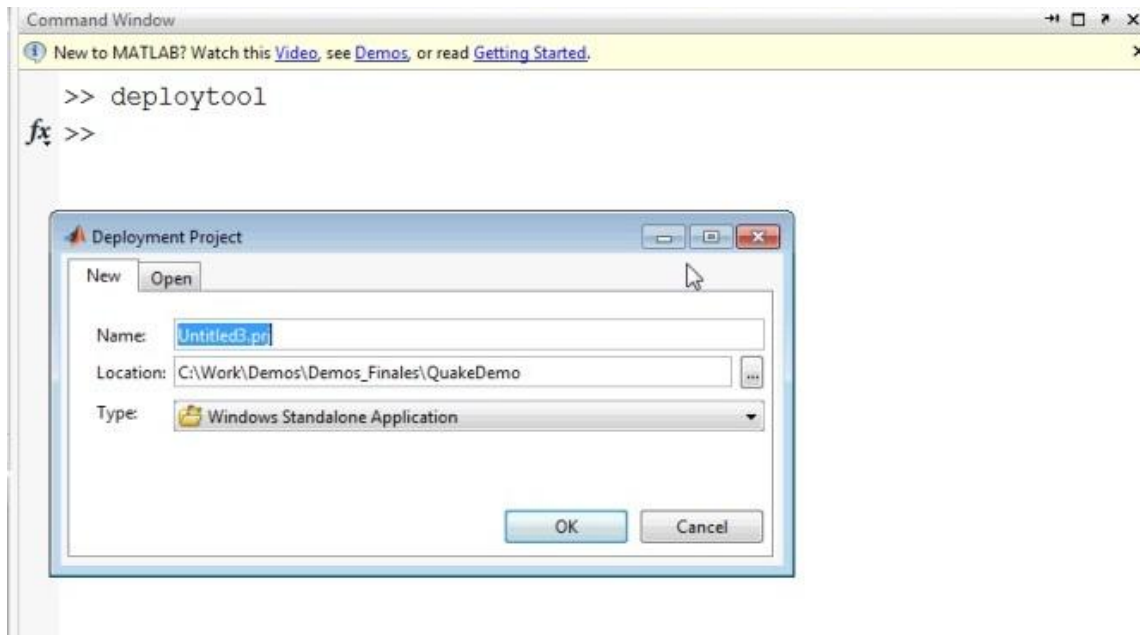


Fig. 5.21 Instrucción para la creación de nuevos ejecutables.

De este modo, en esta ventana se ofrece la posibilidad de elegir diferentes opciones para nuestro archivo de salida, cambiar el nombre al archivo y elegir su futura localización.

De aquí, se va a parar a otra ventana en la cual se han de elegir los *scripts* que se quieran incluir. Con introducir el archivo principal es suficiente, ya que las subrutinas dependientes de este archivo, serán incluidas por Matlab sin necesidad de incluirlas a mano. Este hecho se aprecia en la siguiente figura:

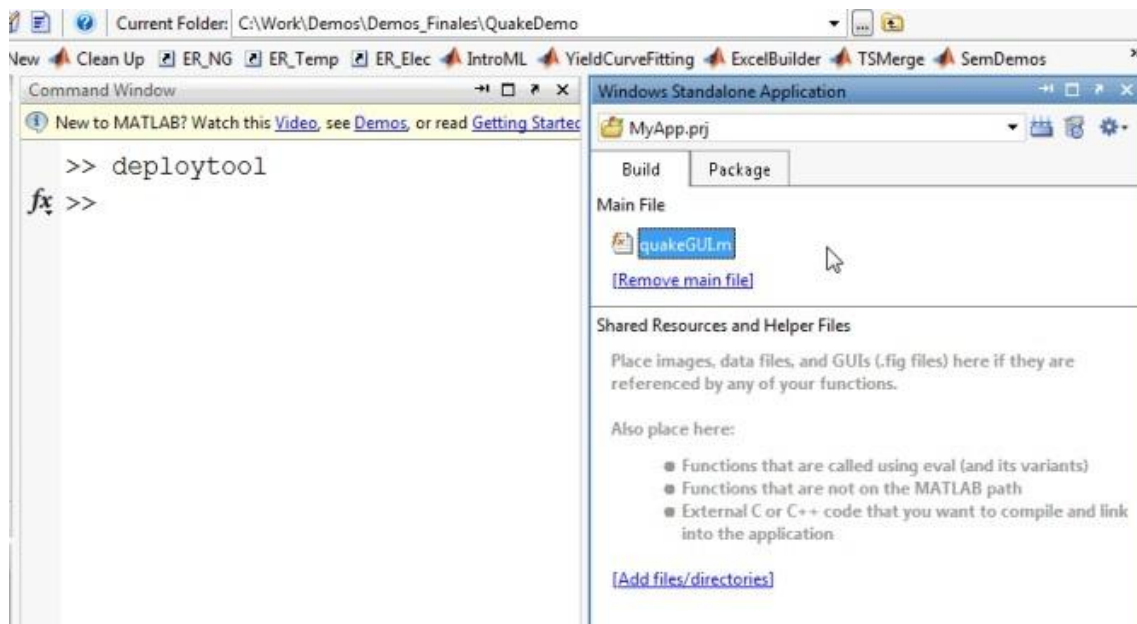


Fig. 5.22 Adición de archivos .m.

Al continuar con esta opción, no se está haciendo más que, encriptar el contenido de Matlab, y crear a su alrededor un ejecutable.

Si es necesaria la utilización de *builders* para entornos específicos, significa que se quiere crear ejecutables en versión Web.

Los pasos son iguales a los descritos anteriormente, con la salvedad de que aquí si que hay que introducir en el proyecto las subrutinas dependientes del programa principal, ya que si no es será imposible de ejecutar en la Web.

La otra salvedad, es que para arrancar el *web server*, se debe disponer de herramientas adicionales, por ejemplo, para crear una interface en un entorno Web, totalmente ejecutable desde cualquier ordenador, se necesita el *Apache Tomcat*, o en su defecto, herramientas equivalentes.

Una de las mayores ventajas de crear de esta manera el ejecutable, es que las actualizaciones se pueden realizar desde el sistema del proveedor, y ser disfrutados de manera inmediata por los clientes, sin necesidad de nuevos envíos ni instalaciones.

CAPITULO 6:
SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA DE INDUCCION

6.1 Regímenes posibles según el deslizamiento

En el trabajo, se han realizado diferentes análisis para comprobar el comportamiento de un motor de inducción. Para entender bien el funcionamiento de un motor se debe observar los tipos de comportamiento que puede ofrecer éste. Ya que según el valor del deslizamiento puede actuar como motor o generador. Es decir, cediendo o consumiendo potencia.

En la siguiente figura se puede distinguir los tres tipos de funcionamiento del motor. Es una representación gráfica del par frente al deslizamiento y a la velocidad.

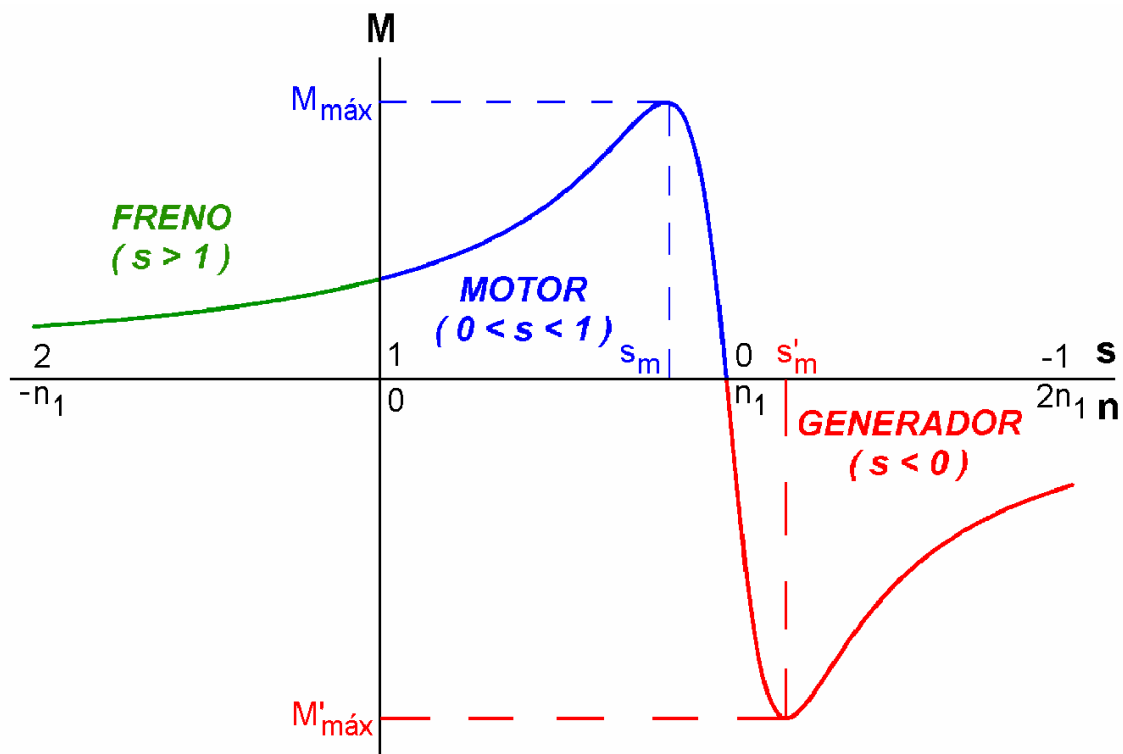


Fig. 6.1 Tipos de comportamiento de máquina asíncrona.

Si el sistema actúa como motor, la velocidad varía entre 0 y la de sincronismo. Esto quiere decir que el deslizamiento siempre estará entre el 0 y el 1. Si esto ocurre, las potencias serán positivas, por lo que estaremos ante un sistema que consume potencia. Por lo tanto, en un motor asíncrono la máquina absorbe potencia en el rotor para convertirla potencia mecánica en el eje de ésta.

Si se está operando en un régimen de funcionamiento diferente, por ejemplo como generador, entonces la velocidad de la máquina superará a la de sincronismo, obteniéndose así un deslizamiento negativo. Por lo tanto las potencias son negativas. Esto significa que la máquina absorbe potencia mecánica en su eje para cederla en forma de energía eléctrica a la red. Aquí la velocidad será positiva y el par negativo.

En el caso de que la velocidad de funcionamiento sea negativa se estará ante un sistema que trabaja en régimen de freno. Esto significa que el deslizamiento será mayor que uno. Como el deslizamiento obtenido es mayor que 1, se obtiene que la R'_c es negativa; sin embargo la suma con la R'_2 será positiva.

Esto hecho da lugar a que la potencia mecánica interna sea negativa y que la potencia en el entrehierro sea positiva. Por lo tanto, en el entrehierro el flujo de potencia es igual que en un motor del estator hacia el rotor. Sin embargo, la potencia mecánica interna es de signo contrario a la de funcionamiento como motor, entra por el eje y va hacia el rotor. Después de todo lo explicado, se llega a la conclusión de que una máquina asíncrona funcionando como freno a contracorriente absorbe potencia eléctrica por el estator y también potencia por el rotor, lo único que este caso, mecánica.

En este caso se obtiene un par positivo, mientras que la velocidad es negativa. O dicho de otra forma, el par de la máquina de inducción se opone a la velocidad y se opone a su movimiento.

En el caso de la aplicación creada se puede variar tanto la velocidad de sincronismo (N_s) cómo la velocidad de funcionamiento de la máquina (N_n).

Para el primer caso descrito anteriormente, en el que la velocidad de sincronismo es mayor que la velocidad de funcionamiento de la máquina que variara entre 0 y la de sincronismo, los resultados ofrecidos se aprecian en la siguiente figura:

6.2 Curva par-velocidad con variación de tensión.

En este apartado se estudiará, la curva par velocidad de una máquina de inducción. Al igual que antes se he de explicar primero el significado de esta curva y los puntos clave, resumidos en la figura 6.2:

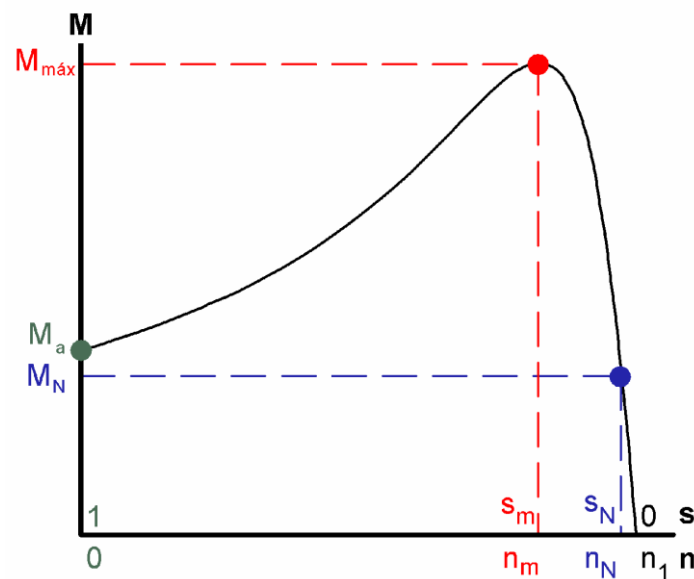


Fig. 6.2 Puntos notables de la curva par- velocidad.

En la figura anterior, se puede observar una curva par-velocidad de una máquina de inducción funcionando en régimen de motor. Se realizará el estudio en esta parte porque es la que más nos interesa.

En la curva se puede apreciar que el punto de par nulo se produce justo a la N_s , esto se conoce como deslizamiento nulo. Este hecho ocurre porque esta curva se refiere al par interno.

Cuando se arranca un motor de inducción la velocidad es todavía nula, y por lo tanto, el deslizamiento igual a 1. Por lo tanto el punto M_a es el punto al que corresponde el par de arranque. Mientras que el punto M_{\max} corresponderá al par máximo y el M_n al par asignado.

Para dar el valor de sobrecarga se debe acudir a la siguiente ecuación:

$$\text{Capacidad de sobrecarga} = \frac{M_{\max}}{M_N} \quad (6.1)$$

Suele tomar unos valores alrededor del 3.

A la hora de estudiar el punto de funcionamiento se debe aclarar que:

$$\text{Punto de funcionamiento: } M = M_r \quad (6.2)$$

Esto es debido a que, cuando un motor asíncrono mueve una carga mecánica operando en régimen permanente, se establece un equilibrio entre el par motor M proporcionado por ésta y el par resistente M_r de la carga. Por lo que el sistema formado por los dos funciona en un punto verificado por la anterior expresión.

Si se tiene un deslizamiento superior al par máximo, el sistema está en la zona inestable, mientras que con un deslizamiento inferior se encuentra en la zona estable.

Si lo que varia es el arranque de la máquina, es decir, si estamos ante un arranque estrella-triángulo o un arranque directo, el resultado se muestra en la figura 6.3 [17].

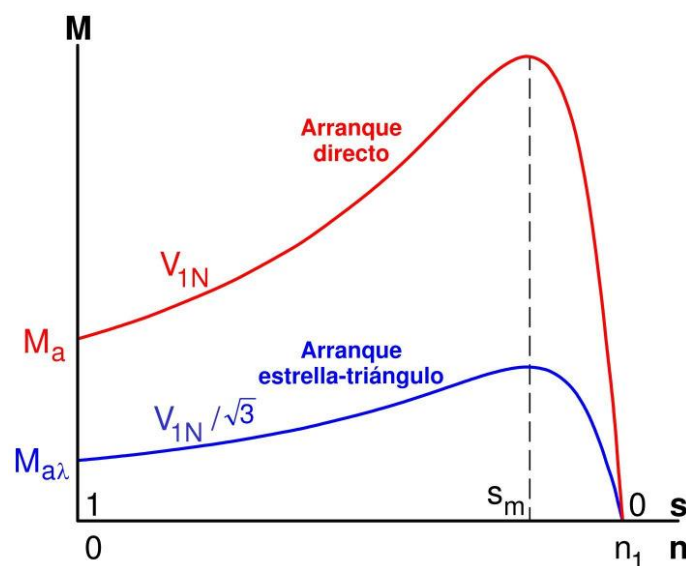


Fig. 6.3 Comportamiento del par según el tipo de arranque.

En las simulaciones realizadas en la interface se pueden apreciar la mayoría de los puntos a los que nos hemos referido.

En la figura 6.4 se aprecia la curva par velocidad, así como el par de carga. La curva superior corresponde a una simulación de 690 voltios, esta tensión es la máxima que se puede dar a la máquina, ya que es su velocidad nominal. Mientras que la línea inferior corresponde a la misma simulación, correspondiente a 380V.

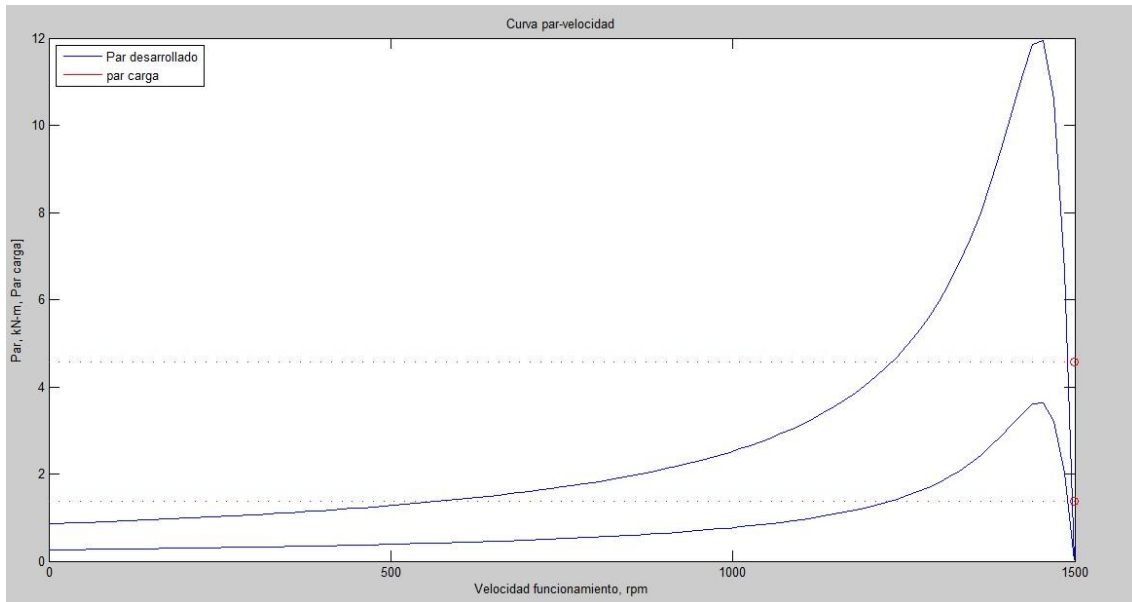


Fig. 6.4 Curva par-velocidad a 690V y 380V de línea.

Al tratarse de una máquina relativamente grande, el par que se tiene como resultado, es también muy grande. El par de carga también nos indica donde se encuentra el punto de funcionamiento, el cual se obtiene según el deslizamiento máximo que se puede obtener en la máquina.

La estabilidad de la máquina siempre estará en el siguiente intervalo de velocidades:

$$Velocidad\ crítica < Velocidad\ equilibrio < Velocidad\ sincronismo$$

Si la velocidad de la máquina esta fuera de este intervalo, los resultados pueden ser inesperados.

6.3 Curva potencia y rendimiento frente a la velocidad

Resumen de balance potencias, en el apartado 2.5.

En la siguiente figura se muestra la potencia absorbida por la máquina puesto que se encuentra en régimen de motor y por tanto no cede potencia sino que la consume. Si se estuviera ante un generador resultarían valores negativos. En la grafica superior se aprecia la potencia que la máquina consume, mientras que en la gráfica inferior se puede observar la potencia que se da a al estator de la máquina.

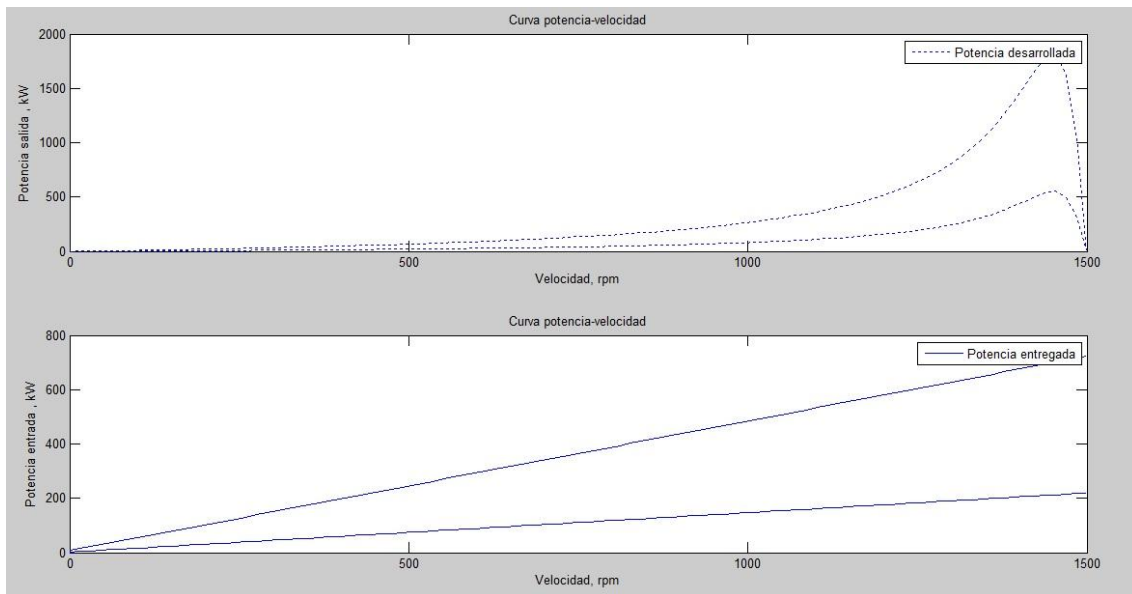


Fig. 6.5 Curva potencia-velocidad a 690 V y 380V.

La potencia pasaría a ser negativa cuando actuará como generador. Ya que de esta manera estaría cediendo potencia, en vez de consumirla. Como se aprecia la potencia real entregada por la máquina es la que aparecería en la zona de funcionamiento.

Los resultados de dicha potencia, se reflejan en el display de la aplicación que posteriormente se mostrará.

Mientras que en la siguiente figura, se aprecia la forma en la que el rendimiento de la máquina va creciendo según nos acercamos a la velocidad de sincronismo. Para entender esta recta, ha de decirse que el rendimiento está calculado como la relación entre la potencia útil que entrega la máquina a la salida, entre la potencia que entra.

Es decir, la potencia mecánica que crea, con la potencia eléctrica que le entra. Si se estuviera en el caso de generadores, la potencia de entrada sería potencia mecánica, mientras que a la salida se generaría potencia eléctrica, directa para poder ser entregada a la red eléctrica.

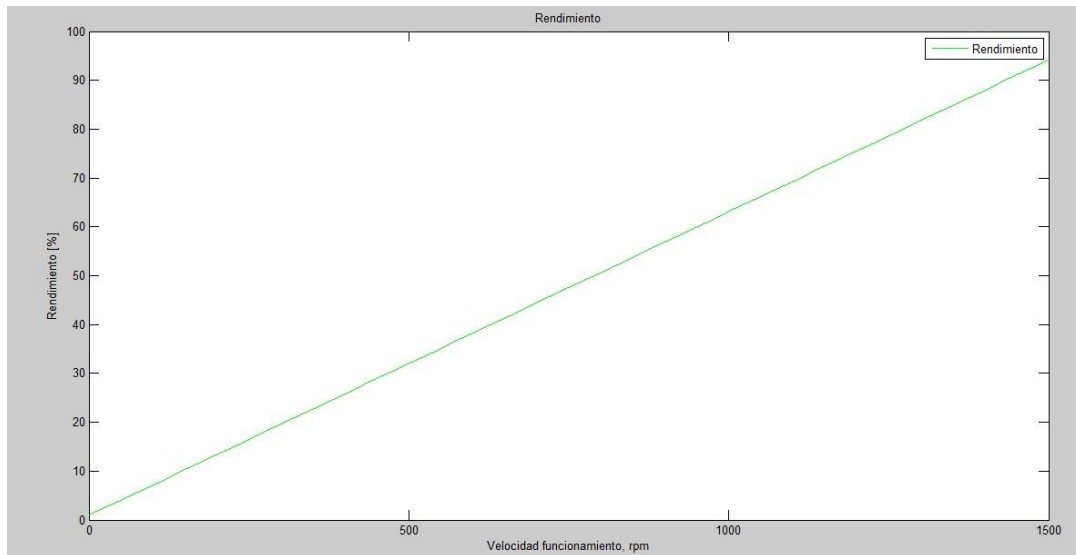


Fig. 6.6 Recta rendimiento-velocidad a 690 V y 380V.

6.4 Curva de la corriente y el factor de potencia respecto a la velocidad.

Cuando se pone a girar por primera vez un motor de inducción se genera una tensión residual que produce un flujo de corriente capacitiva, esto es debido al magnetismo residual de la máquina. Eso se seguirá produciendo en bucle llegando hasta la corriente final. Si no existe residuo magnético dentro del motor, hay que girar por primera vez con un motor externo la máquina para generar este magnetismo. Esto tan sólo es necesario al principio.

Sin embargo el mayor de las máquinas asíncronas es que su volteje crece demasiado con las variaciones de carga, siendo la parte reactiva la más dañina.

En la siguiente figura, se puede apreciar este hecho, al ver como la corriente se encuentra en un valor muy alto al principio, hasta llegar a estabilizarse.

En el arranque directo, la corriente de arranque puede llegar a ser tan grande que dañe el motor. Por este hecho existen varios métodos para regular la corriente de arranque y minimizar así los daños que pueda producir en la máquina. Algunos ejemplos, pueden ser el arranque por introducción de resistencias en serie con el rotor, el mencionado anteriormente arranque estrella-triángulo.

En la siguiente figura se aprecia en la parte superior de la misma, la corriente, mientras en la inferior el factor de potencia. Cuanto menos potencia reactiva se obtiene como resultado en la máquina, el factor de potencia se acercará más a la unidad.

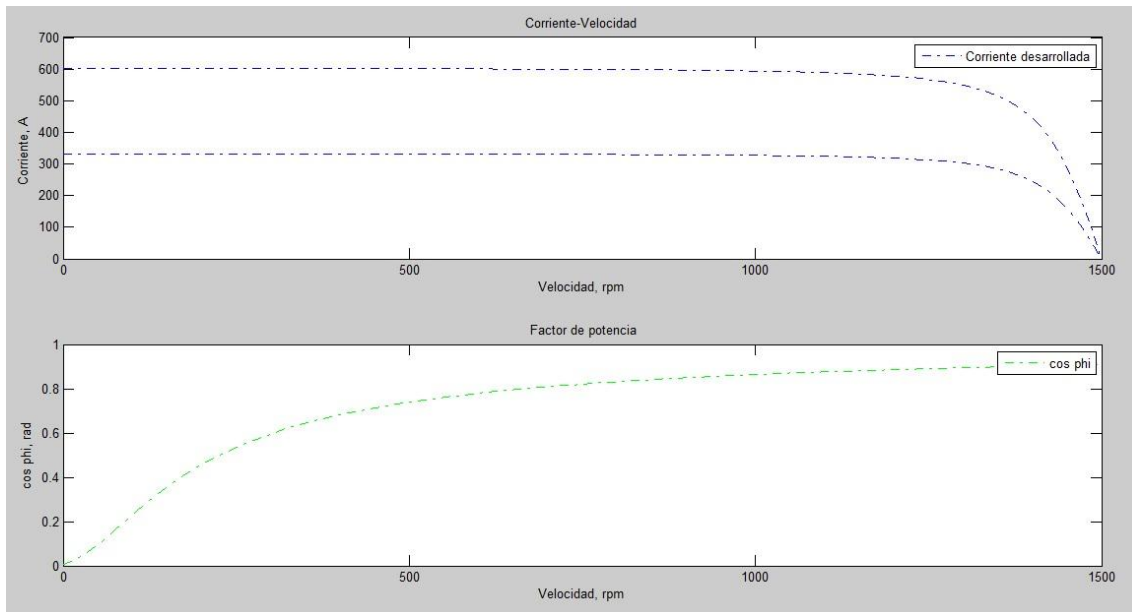


Fig. 6.7 Curva de la corriente y fdp en la máquina de inducción con 690 V y 380V.

Se puede apreciar, cómo el $\cos \phi$ se va acercando a la unidad según sube el número de vueltas aunque el principio resulta muy bajo.

La corriente una vez que ha conseguido arrancar el motor decrece, ya que si se mantuviera a esos valores tan altos, la máquina reduciría de manera drástica su vida útil.

6.5 Estudio de la curva par-velocidad variando nº polos y f

Se puede deducir las fórmulas del sincronismo y del deslizamiento la siguiente expresión:

$$n = n_1 (1 - s) = \frac{60f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad (6.3)$$

Por lo tanto, se puede regular la velocidad de un motor de inducción modificando su número de polos, el deslizamiento o la frecuencia del estator.

- Con la variación de números de polos sólo se pueden alcanzar unos pocos valores de velocidad, esto es debido a que es un número entero y no un valor continuo. Sin embargo en los motores de jaula de ardilla es un método que suele utilizarse siempre y cuando se disponga de dos devanados independientes o uno especial que admita diferentes formas de conexión. En la siguiente figura se puede apreciar el resultado de la simulación en la interface para un número de polos diferente:

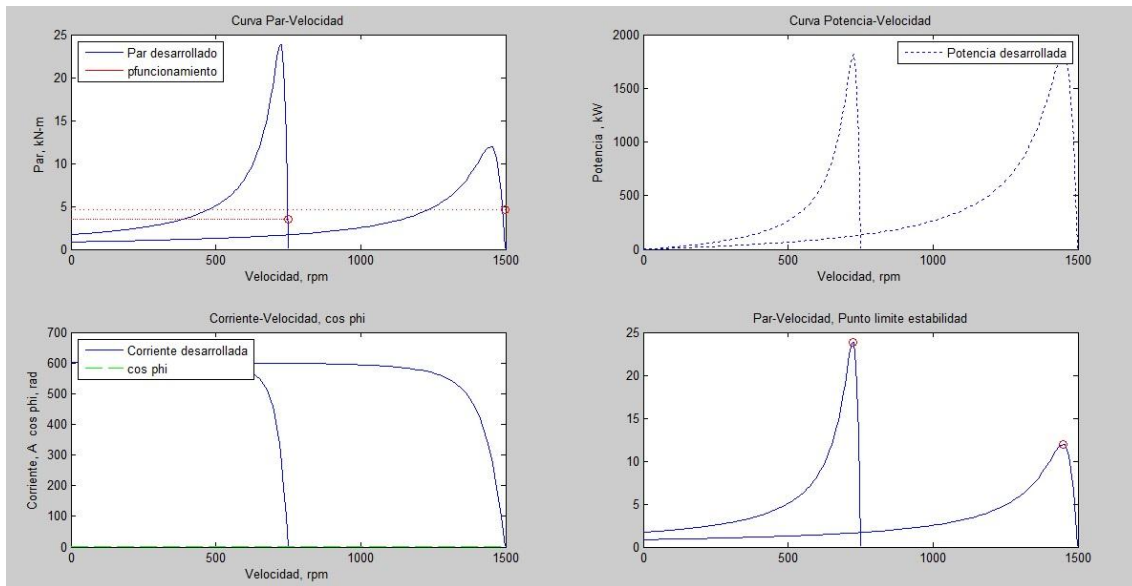


Fig. 6.8 Variación de la velocidad modificando los polos de 4 a 8.

Como se observa, el abanico de posibilidades se reduce en gran medida, porque modificar los polos no ofrece demasiadas posibilidades.

- Modificando el deslizamiento, para llevar a cabo esta acción se puede realizar de muchas formas, bien variando la tensión de entrada, introduciendo resistencias en serie con las fases del rotor... Aunque estos ajustes son muy sencillos de realizar, resultan muy poco eficientes, ya que se aumentan las pérdidas en el motor de manera notable.
- Si se opta por la regulación por variación de frecuencia se debe alimentar el estator por variación de frecuencias. Con este sistema se consigue modificar la velocidad entre un amplio margen de valores. Siempre y cuando el flujo por polo sea constante. Sin embargo, para frecuencias muy pequeñas resulta casi imposible mantenerlo constante. En la siguiente figura se puede apreciar tres rangos de variación de frecuencia para la regulación de la velocidad.

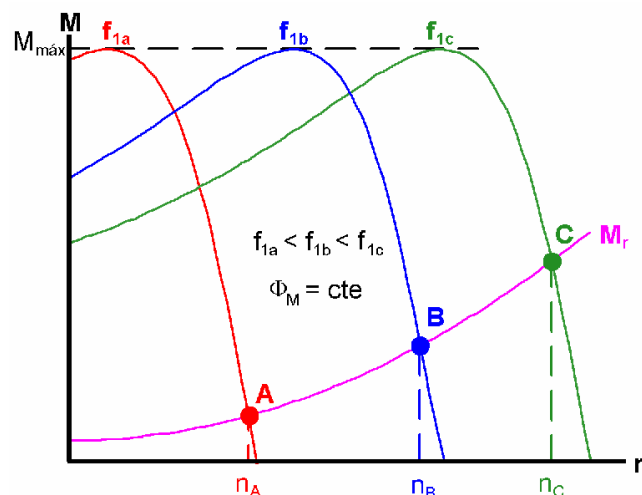


Fig. 6.9 Rango de frecuencias para variar la velocidad.

Extrapolándolo a la interface creada, se pueden ver los siguientes resultados:

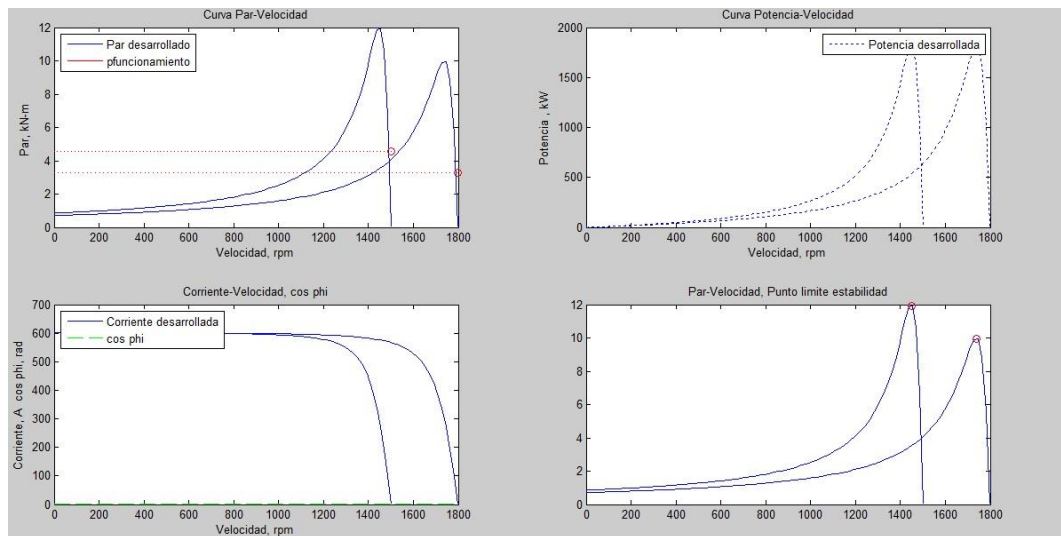


Fig. 6.10 Variación de la frecuencia (50 a 60 Hz) para regular la velocidad.

Este apartado, puede resultar interesante, para comprobar la forma de funcionamiento en varios continentes. Ya que como es sabido, en Europa se trabaja a una frecuencia de 50 Hz mientras que en otros continentes, como en América la frecuencia de la red es de 60 Hz.

6.6 Resultados de los ensayos

Los resultados de los ensayos realizados anteriormente se han ido mostrando en cada apartado. Por lo tanto en este apartado se colocará un pequeño resumen en modo de figuras, en las cuales se pueden observar los resultados por pantalla obtenidos en la interface creada. Y en la figura 6.11 se muestran los resultados dados por la propia interface, con valores prácticamente idénticos a los nominales de la máquina. Los resultados de las potencias se encuentran en kw al igual que el de los pares. En la figura 6.12 se parecía una foto de la interface en funcionamiento.

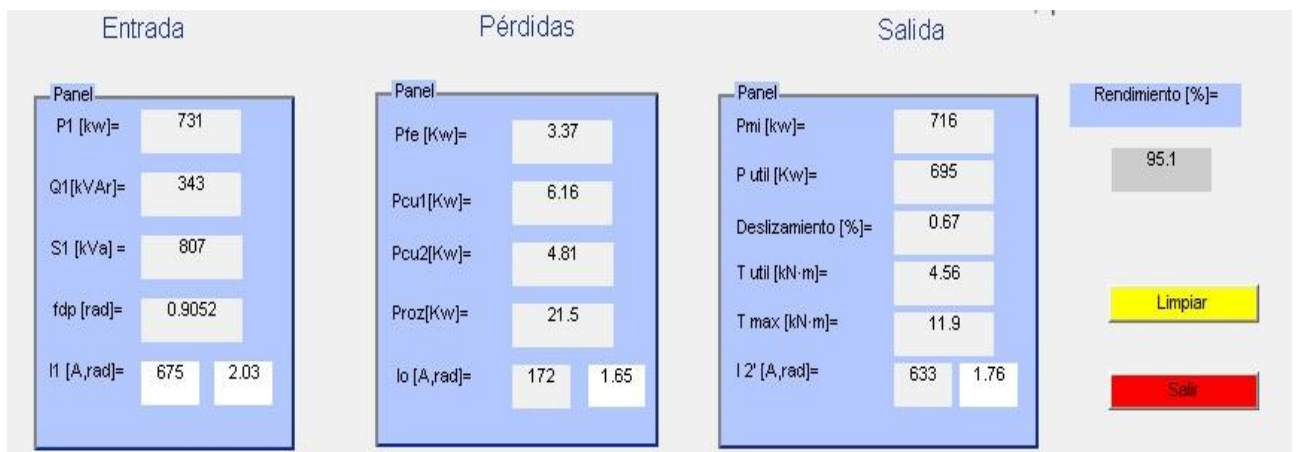


Fig. 6.11 Resultados obtenidos.

Se puede observar cómo funciona el flujo de potencia en la máquina. Ya que los resultados muestran la demanda de la máquina con 690 V, las pérdidas, tanto en el cobre, en el hierro y las de rozamiento, y que se obtiene a la salida. El rendimiento de esta máquina, al igual que se mostro anteriormente, es muy alto, y por lo tanto, se trata de una máquina muy eficiente.

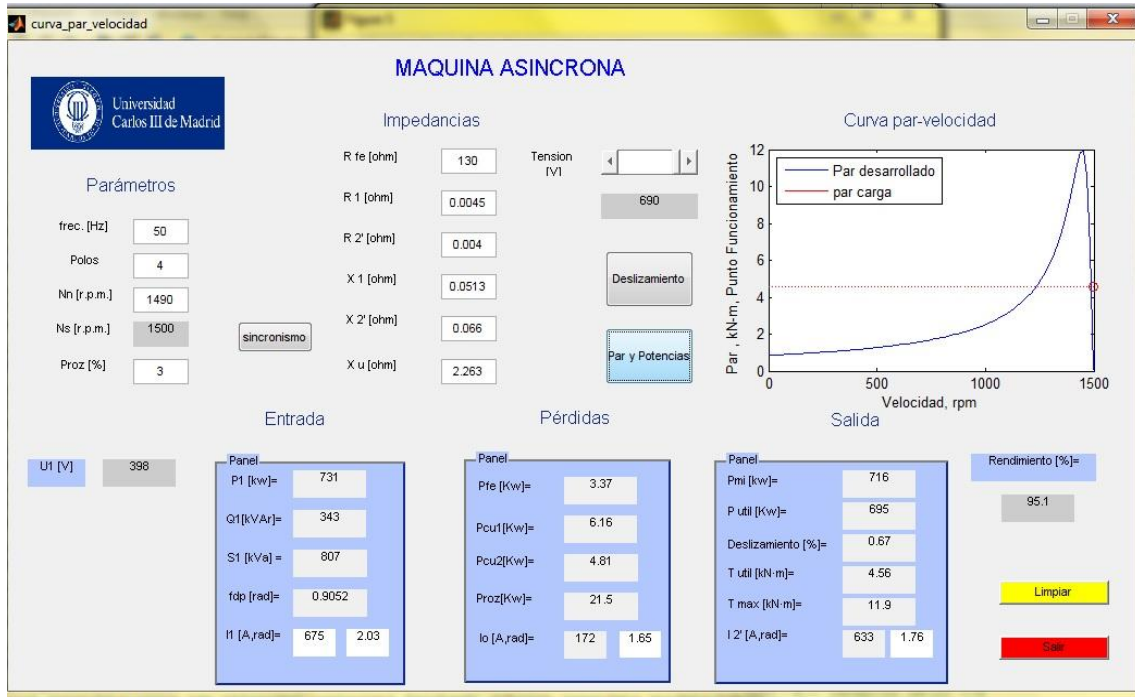


Fig. 6.12 Interface en funcionamiento.

Ésta, es una vista general de la interface, en la cual se muestran todos los resultados, así como el resultado de la curva par-velocidad, para un mejor entendimiento del funcionamiento del motor de inducción.

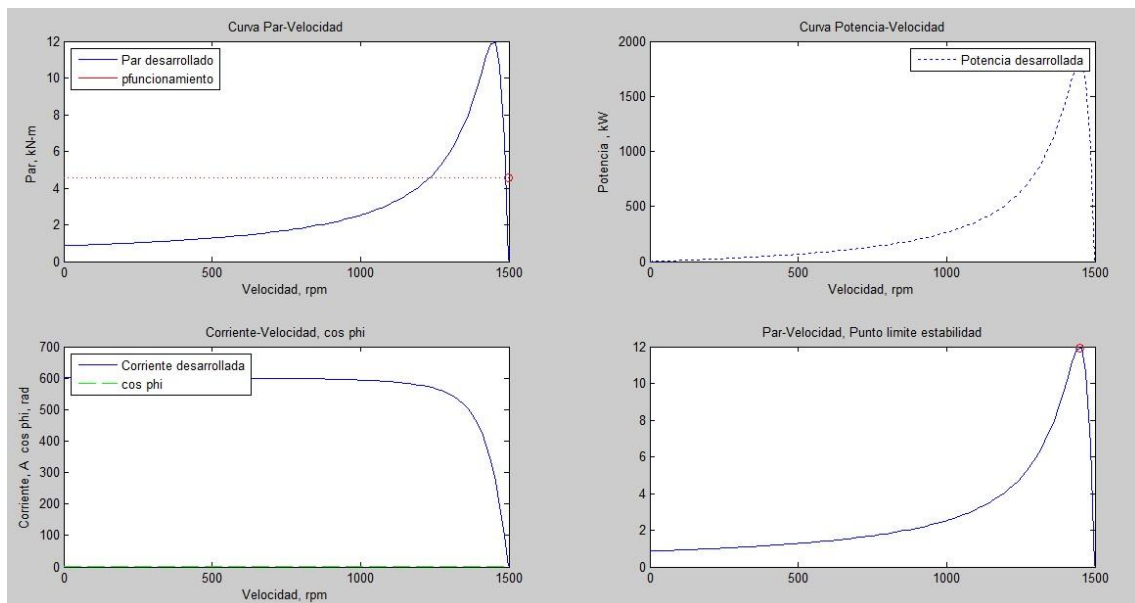


Fig. 6.13 Curvas obtenidas.

En el gráfico, se ha elegido mostrar en la primera gráfica la curva par-velocidad. Mientras que entre la segunda y tercera se puede observar la potencia y la corriente de la máquina de inducción.

En el último gráfico, a diferencia del primero, en el que se estudia el punto de funcionamiento de la máquina, se muestra el punto límite de estabilidad del motor.

Todas las simulaciones se han realizado a 690V para la obtención de las tres últimas gráficas.

CAPITULO 7:
CONCLUSIONES

7.1 Síntesis

1. Se ha descrito el principio de funcionamiento de una máquina de inducción, analizando su circuito eléctrico, magnético y equivalente. También se ha estudiado el balance de potencias de ésta y el tiempo, corriente y par de arranque de cualquier máquina de inducción con rotor de jaula de ardilla.

2. Se ha descrito, según la norma IEC 60034.2.1, el procedimiento para la obtención del circuito equivalente de una máquina de inducción realizando los ensayos de vacío y con el rotor bloqueado.

3. Se ha trabajado sobre la problemática de los huecos de tensión en los sistemas de potencia, su transmisión a la red, los tipos más comunes, su caracterización y de qué manera deben ser estudiados según su naturaleza.

4. Se ha analizado la repercusión de estos huecos de tensión en la red eléctrica española y se han presentado soluciones.

5. Se ha creado una interface en Matlab, en la cual se puede simular el comportamiento de una máquina asíncrona. A su vez, se ha descrito la forma de crear una GUIDE en este programa.

6. También se ha comentado la posibilidad de realizar las simulaciones de la interface creada, no solo en un ordenador que posea Matlab, sino la generación de ejecutables para otras plataformas.

7. Se han realizado simulaciones del comportamiento de la máquina de inducción respecto a los huecos de tensión mostrando las curvas del par, corriente, factor de potencia, etc. respecto a la velocidad. En ese mismo sentido, se ha representado el punto de funcionamiento de la máquina de inducción.

8. En otro sentido, se ha descrito la importancia de estos motores dentro de la energía eólica, ya que las simulaciones se han realizado sobre un motor instalado normalmente en aerogeneradores. Explicando también la distribución de los parques eólicos en España y en Europa, y comparativa en el tiempo.

9. Por último, se han valorado los resultados obtenidos.

7.2 Conclusiones

Por lo tanto, a las conclusiones a las que se han llegado en este trabajo son varias. Una de las principales consecuencias es la demostración de la necesidad de estudio de las perturbaciones en la red que pueden afectar a la alimentación, y por lo tanto a los motores de inducción en su alimentación. Por este motivo las operadoras trabajan sobre este asunto incansablemente para mantener el equilibrio en la red.

Después de este estudio, se demuestra la necesidad de llevar a cabo medidas de protección contra los huecos de tensión en este tipo de máquinas. Si se habla de máquinas de inducción, como en este caso, se necesitan de medidas externas para controlarlas.

Actualmente, un gran número de empresas están capacitadas para proporcionar soluciones ante máquinas de inducción. Si bien, es verdad que existen más posibilidades para máquinas doblemente alimentadas, en ambas hay múltiples soluciones. Pueden ser equipos externos, denominados FACTS (*Flexible Ac Transmission system*), o bien, actualizaciones de los mismos sistemas.

7.3 Líneas futuras

Los futuros trabajos a los que deja las puertas abiertas éste pueden ser los siguientes:

- Introducir en una misma herramienta el cálculo de la curva Par-intensidad respecto a la velocidad. Y unir la parte de la variación de los parámetros con la aplicación de *Matlab/Simulink*. Por lo tanto modelar una máquina de inducción de manera dinámica.
- Crear una interface que sea capaz de considerar el calentamiento del motor, y determinar así como varían los parámetros de éste. Incluso teniendo en cuenta los armónicos.
- Implementar un modelo, que vaya unido a una turbina eólica, teniendo en cuenta el control del paso de pala y el viento como entrada de potencia.
- Incorporar a las simulaciones sistemas de protección ante huecos de tensión, como pueden ser compensadores serie (DVR) o paralelo (STATCOM), sistemas para protección del convertidor rotórico...
- Adaptar e implementar las ecuaciones descritas en la norma IEC 60034.2.1 en vez de las ecuaciones teóricas de la máquina de inducción.

CAPITULO 8:
ESTUDIO ECONÓMICO Y
REPERCUSIONES SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

8.1 Introducción

En el siguiente estudio económico van a aparecer dos presupuestos:

- En el primero, viene detallado el precio a desembolsar para la realización del proyecto descrito en este trabajo, con la creación del software.
- El segundo es el que cualquier empresa debería abonar si desea que las medidas de los parámetros del motor sean realizadas según se ha explicado en el capítulo 3.

Los precios descritos incluyen el I.V.A. (18%)

Por otro lado, estos precios no incluyen los gastos (o disminución de ganancias) por el cese de las actividades que el motor pueda estar realizando.

8.2 Viabilidad económica

Con la necesidad de demostrar la importancia de este trabajo, en este apartado, se procederá a describir de una manera muy breve la situación económica en el que se encuentran los fabricantes de los aerogeneradores, y por tanto, el marco retributivo en el que éstas se encuentran. En la siguiente figura (Fig. 8.1) hay un gráfico en el que se observa en que máximo fabricante con bastante diferencia respecto a los otros es GAMESA.

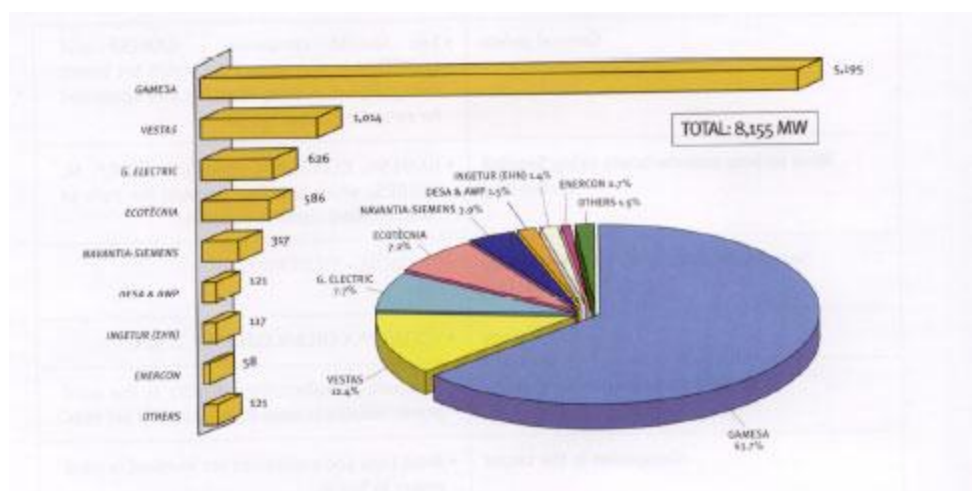


Fig. 8.1 Distribución de la capacidad instalada por fabricante en España a finales de 2004.

En la figura 8.2 se muestra la evolución de la capacidad de energía eólica instalada en España desde sus inicios. Mientras que en la figura 8.3 se muestra la distribución de la potencia eólica instalada por Comunidades Autónomas. El desarrollo de la energía eólica en España, fundamentalmente, es el resultado de los siguientes aspectos:

- El marco retributivo general.
- Los planes de desarrollo eólicos, impulsados por las Comunidades Autónomas.

Las facilidades que ofrece el marco retributivo marco de las instalaciones de aerogeneradores son muchas. Sin embargo, el efecto de los planes de desarrollo eólicos impulsados por las Comunidades Autónomas se pone de manifiesto por el diferente grado de desarrollo en ellas.

Además, comunidades pioneras como Andalucía han sido superadas claramente por comunidades “recién llegadas” al panorama eólico como Castilla La Mancha. La postura de las Comunidades Autónomas activas ha sido motivada por la utilización del sector eólico como generador de riqueza y empleo en el ámbito regional.

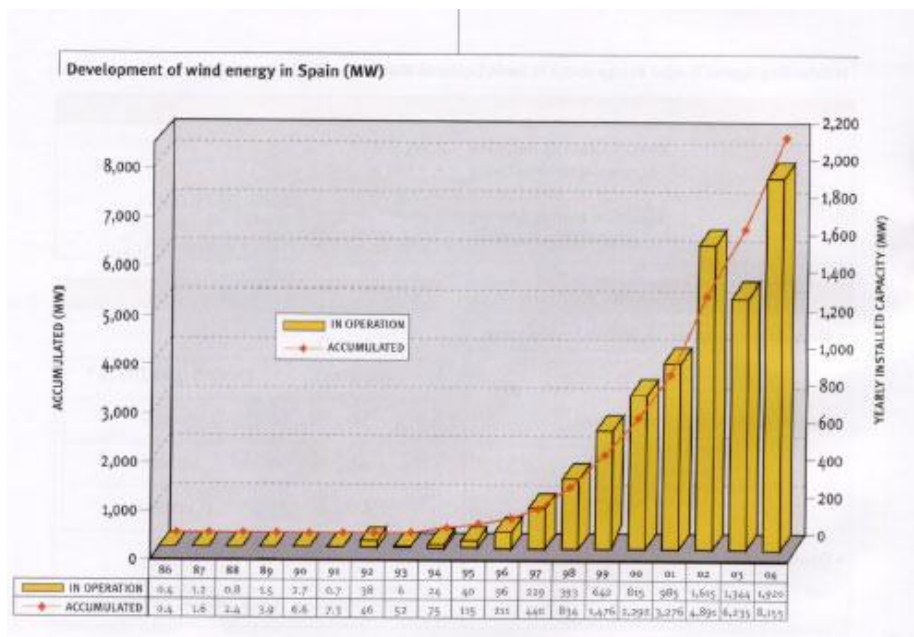


Fig. 8.2 Evolución de la potencia eólica instalada en España.

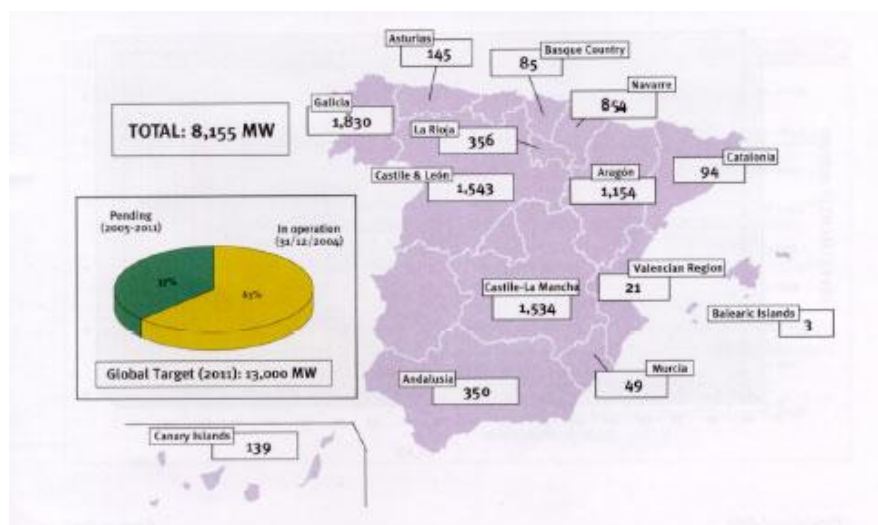


Fig. 8.3 Potencia eólica instalada en España por comunidades Autónomas, a finales de 2004.

8.3 Presupuesto

En el siguiente presupuesto se detalla el precio del trabajo realizado:

MARCA	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO (€)	UNIDADES	PRECIO TOTAL
Matlab	Licencia del programa	580	1	580
Asus	CPU	550	1	550
Mano de obra	Ingeniero técnico	1.500	3 meses	4.500
				5.630

Presupuesto para realizar las medidas directamente del motor de inducción.

MARCA	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO (€)	UNIDADES	PRECIO TOTAL (€)
Rs	Medidor de resistencia	695	1	695
Zes Zimmer	Medidor de potencia	5.190	1	5.190
Magtrol	Freno	19.120	1	19.120
Magtrol	Medidor par-velocidad	6.400	1	6.400
Promedya	Banco de ensayo	4.610	1	4.610
Alteche	Transformador de intensidad	15	3	45
Magtrol	Fuente de alimentación	3.300	1	3.300
TES	Sonda de temperatura	120	1	120
				39.480

8.4 Implicaciones Ambientales

La construcción de máquinas eléctricas en los países que están industrializados, constituye una importante partida económica, probablemente en el sector de la electricidad, la mayor. Si se tiene en cuenta sólo el mercado Europeo de máquinas eléctricas rotativas asciende a casi 10 millones de euros.

Si se tiene en cuenta solamente el número de motores eléctricos, que posee por ejemplo Estados Unidos, nos damos cuenta de que en el siglo pasado se superaban las 125 millones de unidades según el *U.S Department of Energy*.

Por lo tanto, en tal cantidad de motores, un aspecto muy importante es el de la cantidad de CO₂ que éstos pueden emitir a la atmósfera al consumir la energía proporcionada por la red. Esto implica un aumento del efecto invernadero nada beneficiosos para el planeta Tierra.

Debido a este hecho, como se ha explicado en la capítulo 1, los investigadores están enfatizando sobre manera la mejora de la eficiencia energética de los accionamientos eléctricos. Debido a esto, la importancia de este trabajo, ya que permite modificar los parámetros del motor de manera que antes de implementarlo sepamos su respuesta, y se puedan utilizar algunos de los métodos descritos para reducir tanto el consumo en vacío, como sobre todo en el arranque. Este hecho puede evitar muchas prácticas innecesarias para la mejora de los motores, ya que de esta forma no se gastan unos recursos tan valiosos como la energía y el tiempo de fabricación de prototipos para llegar a conseguir unas condiciones óptimas.

Hace unos años, por ejemplo en Estados Unidos, se firmó un acuerdo por el cual todos los fabricantes de motores eléctricos, así como los compradores, se debían comprometer a fabricar/comprar motores con un rendimiento mayor que el estándar.

En este sentido Europa (*Directorate General XVII - Energy*) también se pronunció, con la modificación de la norma del 1996 IEC 60034-2 para dar paso a la nueva norma aprobada en el año 2007 denominada IEC 60034-2-1. La cual promulgaba un nuevo método, más minucioso a la hora de medir la eficiencia de los motores para reducir así el consumo de éstos.

También en Europa se ha desarrollado un nuevo programa designando las clases de eficiencia energética para motores de corriente alterna. En este programa han participado los fabricantes agrupados bajo las siglas CEMEP (*European Comitee of Manufactures of Electrical Machines and Power Electronics*) y la comisión europea nombrada anteriormente.

Los resultados esperados por la Unión Europea en este sentido son los siguientes:

- Reducción del consumo de energía en Europa.
- Reducción de los costes de la Industria Europea.
- Reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera por parte de la UE.

BIBLIOGRAFIA

Libros y publicaciones:

- [1] Jordi Vidal Bort 'Estudio del Modelo Matemático del Motor de Inducción Trifásico. Simulación en Régimen Dinámico', Universitat Rovira I Virgili. Junio de 2002.
- [2] J. S. Feito, '*Máquinas eléctricas*', (Prentice Hall, 2002).
- [3] J. Fraile Mora, '*Máquinas eléctricas*', (Mc Graw Hill, 2003, 5ª edición).
- [4] S.J. Chapman, '*Máquinas eléctricas*', (Mc Graw Hill, 2000, 3ª edición).
- [17] Miguel Ángel Rodríguez Pozueta, '*Electrotecnia para ingenieros no especialistas, máquinas asíncronas*'. Universidad de Cantabria, 2008.

Revistas

- [6] Smith, T., and Jones, M.: '*Nueva norma IEC define niveles de eficiencia de motores de CA de baja tensión*', ABB Uruguay, artículo técnico (núm. 72), (2007)

Tesis Doctorales y proyectos fin de carrera:

- [5] Freyre Maciá. M, '*Estudio de la evolución de la curva par/velocidad de motores eléctricos de inducción desde el régimen dinámico al estático mediante la validación del modelo teórico con los ensayos prácticos en el laboratorio*'. Proyecto, UPC, 2005.
- [7] Christian Pasquet Ibañez, '*Análisis del motor de inducción mediante técnicas de programación no lineal*', Proyecto fin de carrera, Febrero de 2010.
- [11] L. G. Pesquer, '*Efectos de los huecos de tensión en las máquinas de inducción y en los transformadores trifásicos*', Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Enero de 2006.
- [12] Martínez Corpa, M. y Pérez Regalado, M.J. '*Análisis y procedimientos de ensayo de sistemas eólicos ante huecos de tensión*'. Tesis Doctoral, UC3M, 2005.
- [16] Rodríguez Arribas, Jaime, '*Control vectorial óptimo de accionamientos eléctricos asíncronos con par resistente dependiendo de la velocidad*'. Tesis doctoral, UPM, 1999.

Páginas Web:

- [8] Respuesta del generador asíncrono ante huecos de tensión, [http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/7998/1/PFC Miguel Angel Sepulveda Gonzalez.pdf](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/7998/1/PFC_Miguel_Angel_Sepulveda_Gonzalez.pdf), Último acceso: Enero de 2012.
- [9] *Eólica 2008*, Asociación Empresarial Eólica, disponible en http://www.aeeolica.es/doc/Eolica_2008_baja.pdf, Último acceso: Noviembre de 2011.
- [10] Red Eléctrica de España, www.ree.es, Último acceso: Enero de 2012.

[13] Manual de Gui en Matlab, <http://es.scribd.com/doc/15532859/MANUAL-DE-GUI-EN-MATLAB>, último acceso: Enero de 2012.

[14] Diseño de interfaz gráfica en Matlab, <http://es.scribd.com/doc/15532859/MANUAL-DE-GUI-EN-MATLAB>, último acceso: Diciembre de 2011.

Webinario:

[15] Pilar Fernández, Distribución de aplicaciones desde MATLAB: http://www.mathworks.es/company/events/webinars/wbnr60494.html?seq=1&s_v1=33134073_1-DTTNXH, ultimo acceso, diciembre de 2011.

ANEXO

Código

```
function varargout = curva_par_velocidad(varargin)

% CURVA_PAR_VELOCIDAD M-file for curva_par_velocidad.fig
%   CURVA_PAR_VELOCIDAD, by itself, creates a new
%   CURVA_PAR_VELOCIDAD or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = CURVA_PAR_VELOCIDAD returns the handle to a new
%   CURVA_PAR_VELOCIDAD or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   CURVA_PAR_VELOCIDAD('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...)
%   calls the local
%   function named CALLBACK in CURVA_PAR_VELOCIDAD.M with the given
%   input arguments.
%
%   CURVA_PAR_VELOCIDAD('Property','Value',...) creates a new
%   CURVA_PAR_VELOCIDAD or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value
%   pairs are
%   applied to the GUI before curva_par_velocidad_OpeningFcn gets
%   called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property
%   application
%   stop. All inputs are passed to curva_par_velocidad_OpeningFcn
%   via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's mostrar1 Tools menu. Choose "GUI
%   allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help
% curva_par_velocidad

% Last Modified by GUIDE v2.5 11-Feb-2012 18:12:05

% Begin initialization code - DO NOT EDIT

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @curva_par_velocidad_OpeningFcn,
                  ...
                  'gui_OutputFcn',  @curva_par_velocidad_OutputFcn,
                  ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
```

ANEXO

```
        gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});  
end  
% End initialization code - DO NOT EDIT
```

ANEXO

```
% --- Executes just before curva_par_velocidad is made visible.
function curva_par_velocidad_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to curva_par_velocidad (see
VARARGIN)

% Choose default command line output for curva_par_velocidad
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes curva_par_velocidad wait for user response (see
UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
% Codigo para que aparezcan las imagenes en la ventana

A=imread('Peque', 'bmp');
A=uint8(A);
Img=image(A, 'Parent', handles.axes4);
set(handles.axes4, 'Visible','off','YDir','reverse',...
    'XLim',get(Img,'XData'),'YLim',get(Img,'YData'));

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = curva_par_velocidad_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on slider movement.
function tension_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
u1=get(handles.tension,'value');
u1=u1*690;
set(handles.tension1,'string',num2str(u1));
handles.u1=u1;
guidata(gcbo,handles);

% --- Executes on slider movement.
```

ANEXO

```
function deslizamiento_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to deslizamiento (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
s=get(handles.deslizamiento,'value');
%s=s*5
set(handles.mostrar,'string',num2str(s));
handles.s=s;
guidata(gcbo,handles);
```

```
function polos_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to polos (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of polos as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of polos
as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function polos_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to polos (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function impedancia_r_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to impedancia_r (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of impedancia_r as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
impedancia_r as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function impedancia_r_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to impedancia_r (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called
```

ANEXO

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function impedancia_u_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to impedancia_u (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of impedancia_u as
text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
impedancia_u as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function impedancia_u_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to impedancia_u (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function impedancia_s_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to impedancia_s (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of impedancia_s as
text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
impedancia_s as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function impedancia_s_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to impedancia_s (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
```

ANEXO

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function resistencia_r_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to resistencia_r (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of resistencia_r as
text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
resistencia_r as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function resistencia_r_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to resistencia_r (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function resistencia_s_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to resistencia_s (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of resistencia_s as
text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
resistencia_s as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function resistencia_s_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to resistencia_s (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

ANEXO

```
function s_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to mostrar1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of mostrar1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
mostrar1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function mostrar1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to mostrar1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

function nominal_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to nominal (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of nominal as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of nominal
as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function nominal_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to nominal (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
```

ANEXO

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function sincronismo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to mostrar7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of mostrar7 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
mostrar7 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function mostrar7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to mostrar7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

clear;
clear global;

%% obtengo controles
s= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar');
Putil= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar1');
P1= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar2');
Q1= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar3');
reactiva= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar4');
Pmi= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar5');
maxTTe= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar6');
Ns= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar7');
fpd= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar8');
Tutil= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar9');
Pfel= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar10');
Pcul= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar11');
Pcu2= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar12');
Proz= findobj(gcf,'Tag', 'mostrar13');

% Los borro todos
limpia= '';
set (s, 'string', limpia);
```


ANEXO

```
set (Putil, 'string', limpia);
set (Pl, 'string', limpia);
set (Ql, 'string', limpia);
set (reactiva, 'string', limpia);
set (Pmi, 'string', limpia);
set (maxTTe, 'string', limpia);
set (Ns, 'string', limpia);
set (fpd, 'string', limpia);
set (Tutil, 'string', limpia);
set (Pfel, 'string', limpia);
set (Pcu1, 'string', limpia);
set (Pcu2, 'string', limpia);
set (Proz, 'string', limpia);

% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in calcular.
function calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Introduzco los datos
Nn = str2double(get(handles.nominal, 'String'));
p = str2double(get(handles.polos, 'String'));
f = str2double(get(handles.pulsacion, 'String'));

% Deslizamiento
Ns= 60*f/(p/2);
s=(Ns-Nn)/Ns;
w= 0:10:Ns;

%Vectores para representar

inicio=0;paso=10;
for Ns= 0:paso:Ns;
    inicio=inicio+1;
    lengthw=size(w);lw=lengthw(2);
    Stemp = (Ns-Nn)/Ns;
    S1(inicio)= Stemp;
end

% mostrar1 variables

set(handles.mostrar, 'String', num2str(s*100,2))
format 'bank'

% hObject    handle to calcular (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

ANEXO

```
function pulsacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pulsacion (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of pulsacion as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
pulsacion as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function pulsacion_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pulsacion (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in calcularl.
function calcularl_Callback(hObject, eventdata, handles)

% Bucle infinito

ii=2;

while ii>1
ii= ii+1;

a=input('71: ','s'); % valor de Q en ASCII

%if input K = 0;
%    break
%end

%if ii>1
%ii= ii+1;
%void keyPress(int keycode)
%elseif input K
```

ANEXO

```
% Introduzco los datos

Rc = str2double(get(handles.resistencia_c, 'String'));
Rs = str2double(get(handles.resistencia_s, 'String'));
Rr = str2double(get(handles.resistencia_r, 'String'));
Xs = str2double(get(handles.impedancia_s, 'String'));
Xr = str2double(get(handles.impedancia_r, 'String'));
Xu = str2double(get(handles.impedancia_u, 'String'));
p = str2double(get(handles.polos, 'String'));
f = str2double(get(handles.pulsacion, 'String'));
u1=get(handles.tension, 'value');
u = str2double(get(handles.tension1, 'String'));
s = get(handles.mostrar, 'value');
s1 = str2double(get(handles.mostrar, 'String'));
Ns = str2double(get(handles.mostrar7, 'String'));
Nn = str2double(get(handles.nominal, 'String'));
Pr = str2double(get(handles.rozamiento, 'String'));
w1=314.14;
%phi = str2double(get(handles.factor_potencia, 'String'));
%u1 = str2double(get(handles.tension, 'String'));

%Maquina asincrona
format long
ue=u/sqrt(3);
s1=(Ns-Nn)/Ns;

%Impedancias equivalentes
Zd= Rr*((1/s1)-1);
Zr= (Rr/s1)+ Xr*1i;
Xp= (1/Rc)+(1/(Xu*1i))+(1/Zr);
Zp= 1/Xp;

% Impedancia total
Zt= Rs+(Xs*1i)+Zp;

%Corriente
I1 = ue/Zt;

%potencias

S1= 3*ue*conj(I1);
reactiva= norm(S1,2);

P1 = real (S1);
Q1 = imag (S1);
fdp= cos(atan (Q1/P1));

%Tension magnetizacion

Vab= Zp*I1;
I2p=Vab/Zr;
Ife= Vab/Rc;
Iu= Vab/Xu;
I0= Ife+Iu;
aI1= (angle(I1));
aI0= (angle(I0));
aI2p= angle(I2p);
AI1= acos(aI1);
```

ANEXO

```
AI0= acos (aI0);
AI2p= acos (aI2p);
pmi =3*Zd*(I2p)^2;
Pmi= norm(pmi,2);
Proz= Pr*0.01*Pmi;
Putil= Pmi-Proz;

% Velocidad de sincronismo

Ns= 60*f/(p/2);

%Par util
Ps= Pmi/1-s1; %potencia en el entrehierro

Tutil= Ps/((2*pi*Ns)/60);

%Perdidas
modI1= norm(I1,2);
modIfe= norm(Ife,2);
modVab= norm(Vab,2);
modI2p= norm(I2p,2);

Pcu1= 3*Rs*(modI1^2);
Pfe1= 3*modVab*modIfe;
Pcu2= 3*Rr*(modI2p^2);

rendimiento= norm(Putil,2)/norm(P1,2);

% equivalente thevenin
ue=u/sqrt(3);
RcXu=Rc*j*Xu/(Rc+j*Xu);
VTh=RcXu*ue/(Rs+j*Xs+RcXu);
ang=angle(VTh)*180/pi;
VTh=abs(VTh);
ZTh=RcXu*(Rs+j*Xs)/(RcXu+Rs+j*Xs);
RTh=real(ZTh); XTh=imag(ZTh);

% Curva par-potencia-velocidad

npts=99; s=linspace(0.00001,1,npts);
s=fliplr(s);
ws=2/p*2*pi*f;
R2pr0=Rr; X2pr0=Xr;

TTe=zeros(1,npts); nm=TTe;

% introduzco los valores para las graficas respecto velocidad
for i=1:npts
    TTe(i)=3*VTh^2*Rr/s(i)/ws/((RTh+Rr/s(i))^2+(XTh+Xr)^2);
    TRe(i)= (Putil*(i)/P1);
```

ANEXO

```
%Curvas intensidad, fdp y potencia
TPs(i)=(1-s(i))*ws*TTe(i)/1000;
TI(i)= ue/(sqrt((Rr/s(i))^2+(Xr^2)))/10;
Tcos(i)= 1- cos (atan (s1*(i)*Xr/Rr));
TPe(i)= real (S1)*(i)/1000000;
nm(i)=(1-s(i))*ws*30/pi;

smax=Rr/(sqrt(Rs^2+(Xs+Xr)^2));
ncritica= nm *(1-smax);
s1max=Rr/(sqrt(Rs^2+(Xs*s1i+Xr*s1i)^2));
nfuncionamiento= nm *(1-s1max);
end

%deslizamiento critico

maxTTe=max(TTe);
maxncritica=max(ncritica);
maxfuncionamiento = max(nfuncionamiento);

%maxTPe=max(TPe);%kw
%[TPe_opt,N_opt]=max(TPe);
%wopt=200+1.*(N_opt-1);
%P_opt=[wopt;TPe_opt];

% curva par, rendimiento - velocidad

% Figura del dibujo
h=gca;
axes(h);
plot(nm,TTe/1000,nfuncionamiento,Tutil/1000, 'r-
',maxfuncionamiento,Tutil/1000,'ro');
xlabel('Velocidad, rpm'); ylabel('Par , kN-m, Punto Funcionamiento ');
legend('Par desarrollado', 'par carga',2);
hold on;

% Figura 1
figure(1)
plot(nm,TTe/1000,nfuncionamiento,Tutil/1000, 'r-
',maxfuncionamiento,Tutil/1000,'ro');
title('Curva par-velocidad');
xlabel('Velocidad funcionamiento, rpm'); ylabel(['Par, kN-m, Par
carga']);
legend('Par desarrollado', 'par carga',2);
hold on;

%curva potencias - velocidad

figure(2)
subplot(2,1,1),plot(nm,TPs,'b:');
title('Curva potencia-velocidad');
xlabel('Velocidad, rpm'); ylabel(['Potencia salida , kW']);
legend('Potencia desarrollada',1);
hold on;

subplot(2,1,2),plot( nm,TPe);
```

ANEXO

```
title('Curva potencia-velocidad');
xlabel('Velocidad, rpm'); ylabel(['Potencia entrada , kW']);
legend('Potencia entregada',1);
hold on;

%curva corriente, cos phi - velocidad

figure(3)
subplot(2,1,1),plot(nm, TI, 'b-.');

title('Corriente-Velocidad');
xlabel('Velocidad, rpm'); ylabel(['Corriente, A ']);
legend('Corriente desarrollada',1);
hold on;
subplot(2,1,2),plot(nm,Tcos, 'g-.');
title(' Factor de potencia');
xlabel('Velocidad, rpm'); ylabel('cos phi, rad');
legend('cos phi',1);
hold on;

% Representacion sobre la curva par velocidad del punto de trabajo
figure(4)
plot(nm,TRe, 'g');
title('Rendimiento');
xlabel('Velocidad funcionamiento, rpm'); ylabel(['Rendimiento [%]']);
legend('Rendimiento ');
hold on;

% Grafica con todo junto

figure(5)

subplot(2,2,1),plot(nm,TTe/1000,nfuncionamiento,Tutil/1000, 'r-
',maxfuncionamiento,Tutil/1000, 'ro');

title('Curva Par-Velocidad');
xlabel('Velocidad, rpm'); ylabel(['Par, kN-m ']);
legend('Par desarrollado', 'pfuncionamiento',2);
hold on;

subplot(2,2,2),plot(nm,TPs, 'b:');

title('Curva Potencia-Velocidad');
xlabel('Velocidad, rpm'); ylabel(['Potencia , kW']);
legend('Potencia desarrollada',1);
hold on;

subplot(2,2,3),plot(nm, TI, nm, Tcos, 'g--');

title('Corriente-Velocidad, cos phi');
xlabel('Velocidad, rpm'); ylabel(['Corriente, A ' ...
'cos phi, rad']);
legend('Corriente desarrollada', 'cos phi',2);
hold on;

subplot(2,2,4),plot(nm,TTe/1000,maxncritica,maxTTe/1000, 'ro');
```

ANEXO

```
title('Par-Velocidad, Punto limite estabilidad');
hold on;

%mostrar las variables

set(handles.mostrar1, 'String', num2str(Putil/1000,3))
set(handles.mostrar2, 'String', num2str(P1/1000,3))
set(handles.mostrar3, 'String', num2str(Q1/1000,3))
set(handles.mostrar4, 'String', num2str (reactiva/1000,3))
set(handles.mostrar5, 'String', num2str(Pmi/1000,3))
set(handles.mostrar6, 'string', num2str(maxTTe/1000,3))
set(handles.mostrar7, 'string', num2str(Ns))
set(handles.mostrar8, 'string', num2str(fdp))
set(handles.mostrar9, 'String', num2str(Tutil/1000,3))
set(handles.mostrar10, 'string', num2str(Pfe1/1000,3))
set(handles.mostrar11, 'string', num2str(Pcu1/1000,3))
set(handles.mostrar12, 'string', num2str(Pcu2/1000,3))
set(handles.mostrar13, 'string', num2str(Proz/1000,3))
set(handles.mostrar14, 'string', num2str(ue,3))
set(handles.mostrar15, 'string', num2str(abs(I1), 3))
set(handles.mostrar16, 'string', num2str(rendimiento*100,3))
set(handles.mostrar17, 'string', num2str(abs(I0),3))
set(handles.mostrar18, 'string', num2str(abs(I2p),3))
set(handles.mostrar19, 'string', num2str(AI1,3))
set(handles.mostrar20, 'string', num2str(AI0,3))
set(handles.mostrar21, 'string', num2str(AI2p,3))

%Bucle para la simulación

if a == 72
    ii = 2;
elseif a ==71

    ii=0;
    disp(a)

end

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function tension_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to tension (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

ANEXO

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes3

function factor_potencia_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to factor_potencia (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of factor_potencia as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
factor_potencia as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function factor_potencia_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to factor_potencia (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function mostrar_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to mostrar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
close (gcbf)
close all

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function tension1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```


ANEXO

```
% hObject    handle to tension1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function deslizamiento_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to deslizamiento (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called


% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end


function resistencia_c_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to resistencia_c (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of resistencia_c as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
resistencia_c as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function resistencia_c_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to resistencia_c (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


% --- Executes on button press in stop.
function stop_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to stop (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

ii=0;


% --- Executes on button press in calcular2.
```

ANEXO

```
function calcular2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to calcular2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

p = str2double(get(handles.polos, 'String'));
f = str2double(get(handles.pulsacion, 'String'));

% Velocidad de sincronismo

Ns= 60*f/(p/2);

set(handles.mostrar7, 'string', num2str(Ns))


function rozamiento_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to rozamiento (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of rozamiento as text
%        str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of
rozamiento as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function rozamiento_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to rozamiento (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end
```

